



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH A ANALÝZA RÁMU SILNIČNÍHO KOLA Z
KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU**

DESIGN AND ANALYSIS OF THE ROAD BIKE MADE FROM COMPOSITE MATERIAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Barbora Dvořáková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Šebek, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studentka: **Bc. Barbora Dvořáková**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce: **Ing. František Šebek, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a analýza rámu silničního kola z kompozitního materiálu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současné možnosti deformačně–napěťových analýz a vyvinutých materiálů umožňují efektivně navrhovat lehké, ale přitom dostatečně pevné a tuhé rámy jízdních kol. Zpracujte tedy rešerši zabývající se kompozity se zaměřením na jejich využití při výrobě jízdních kol a na základě dosavadních znalostí mechaniky kompozitů navrhnete materiál a skladbu kompozitu pro rám silničního kola. Pomocí metody konečných prvků modelujte testy, které se na rámech provádí. Obdržené výsledky vyhodnoťte a navrhnete možné úpravy skladby kompozitu.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše týkající se kompozitů ve vztahu k výrobě jízdních kol.
2. Návrh materiálu a skladby kompozitu pro rám silničního kola.
3. Analýza rámu silničního kola z pohledu pevnosti i tuhosti.
4. Vyhodnocení výsledků a doporučení pro další práci.

Seznam doporučené literatury:

AMIRI, A., KROSBARKEN, T., SCHOEN, W., THEISEN, D., ULVEN, Ch. A.: Design and manufacturing of a hybrid flax/carbon fiber composite bicycle frame. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, roč. 232, č. 1, str. 28-38, DOI:10.1177/1754337117716237, 2018.

BARBERO, E. J.: Introduction to Composite Materials Design. CRC Press, Boca Raton, 2017.

CHAWLA, K. K.: Composite Materials. Springer-Verlag, New York, 2012.

FUERLE, F., SIENZ, J.: Decomposed surrogate based optimization of carbon-fiber bicycle frames using Optimum Latin Hypercubes for constrained design spaces. Computers & Structures, roč. 119, str. 48-59, DOI:10.1016/j.compstruc.2012.11.014, 2013.

LIU, T. J.-Ch., WU, H.-Ch.: Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon/epoxy composite laminate. Materials & Design, roč. 31, č. 4, str. 1971-1980, DOI:10.1016/j.matdes.2009.10.036, 2010.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na návrh a analýzu rámu silničního kola z kompozitního materiálu. Práce je rozdělena do dvou částí. První část tvoří rešerše zaměřující se na využití kompozitních materiálů při výrobě rámu jízdních kol se zvláštním důrazem na vláknové kompozity, které jsou využívány v cyklistickém průmyslu nejvíce. Je pojednáno o výrobě kompozitních materiálů a o konkrétních technologiích výroby rámu jízdních kol. Předmětem druhé části je návrh rámu a numerická simulace jeho zatížení napodobující zkoušky předepsané normou, které se na rámech provádí. Rám je hodnocen z tuhostního i pevnostního hlediska. Ze vstupního návrhu je postupnými iteracemi odvozen finální rám silničního kola. Na závěr je provedeno zhodnocení výsledků a jsou dána doporučení pro další práci.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rám, silniční kolo, kompozitní materiál, prepreg, vrstvení, metoda konečných prvků, numerická simulace

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the design and analysis of road bike frame made of composite material. The thesis is divided into two parts. In the first part, there is a research focused on the usage of composite materials in relation to making bike frames. The main emphasis is placed on fiber composites, which are most common in cycling. Manufacturing process and production technology are discussed. The aim of the second part is design and the numerical simulation of frame in relation to standard, which is used for the testing of frames. Rigidity and strength are evaluated. The final frame is obtained from the initial design due to several iterations. In conclusion, results are evaluated and recommendations for future work are given.

KEYWORDS

Frame, road bike, composite material, prepreg, layering, finite element method, numerical simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DVOŘÁKOVÁ, Barbora. *Návrh a analýza rámu silničního kola z kompozitního materiálu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/122830>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ing. František Šebek, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Františka Šebka, Ph.D., a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. června 2020

.....

Barbora Dvořáková

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěla poděkovat svému vedoucímu Ing. Františku Šebkovi, Ph.D., za ochotu a trpělivost při udělování cenných rad a připomínek. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a kamarádům za podporu během celého studia.

OBSAH

| | | |
|------|---|----|
| 1 | Úvod..... | 9 |
| 2 | Cíle práce | 10 |
| 3 | Rešerše využití kompozitních materiálů při výrobě rámu jízdních kol | 11 |
| 3.1 | Kompozit | 11 |
| 3.2 | Výroba kompozitních materiálů | 15 |
| 3.3 | Technologie používané při výrobě kompozitových rámu jízdních kol | 19 |
| 4 | Tuhostní zkoušky rámu jízdních kol | 22 |
| 4.1 | Track holding rigidity | 22 |
| 4.2 | Out of saddle rigidity | 23 |
| 5 | Norma definující bezpečnostní požadavky na jízdní kola | 25 |
| 5.1 | Zkouška rázem – padající závaží | 25 |
| 5.2 | Zkouška rázem – padající rám | 26 |
| 5.3 | Únavová (dynamická) zkouška silami při šlapání | 27 |
| 5.4 | Únavová (dynamická) zkouška vodorovnými silami | 29 |
| 5.5 | Únavová (dynamická) zkouška svislou silou | 30 |
| 6 | Návrh rámu silničního kola | 32 |
| 6.1 | Tvorba modelu | 32 |
| 6.2 | Materiálové charakteristiky | 32 |
| 6.3 | Vrstvení kompozitu | 33 |
| 7 | Numerické simulace tuhostních zkoušek navrženého rámu | 35 |
| 7.1 | Out of saddle rigidity | 35 |
| 7.2 | Track holding rigidity | 37 |
| 8 | Numerické simulace pevnostních zkoušek rázem navrženého rámu | 39 |
| 8.1 | Zkouška rázem – padající závaží | 39 |
| 8.2 | Zkouška rázem – padající rám | 43 |
| 9 | Návrh zpevněného rámu silničního kola | 47 |
| 10 | Numerické simulace pevnostních zkoušek rázem zpevněného rámu | 49 |
| 10.1 | Zkouška rázem – padající závaží | 50 |
| 10.2 | Zkouška rázem – padající rám | 50 |
| 11 | Diagram trvalé únavové pevnosti podle Harrise | 52 |
| 12 | Numerické simulace únavových zkoušek zpevněného rámu | 56 |
| 13 | Závěr | 63 |
| 14 | Seznam použitých zdrojů | 65 |
| 15 | Seznam použitých zkratk a symbolů | 67 |

1 Úvod

Zatímco tvar rámu silničních kol je již po desetiletý stejný, jeho materiál se v průběhu let měnil. Zpočátku byly rámy vyráběny výhradně z oceli, později se ke slovu dostaly, pomineme-li různé extravagantní počiny, slitiny hliníku a příležitostně titan. Od 90. let minulého století však můžeme pozorovat vzestup kompozitních materiálů, konkrétně vláknových kompozitů složených z uhlíkových vláken a polymerové matrice. Kompozitní materiály umožňují efektivně navrhovat lehké, ale přitom dostatečně pevné a tuhé rámy jízdních kol. Na rozdíl od ráků z ostatních materiálů je u nich také možno pracovat velmi dobře s jejich aerodynamikou. Mezi další nespornou výhodou patří oproti kovovým rákům lepší opravitelnost.

Rámy z kompozitních materiálů mají pochopitelně i své nevýhody. Pro koncového uživatele je největší nevýhodou vyšší cena, která je způsobena především vysokým podílem ruční práce při výrobě. Další nevýhodou je pak ekologická stránka, ať již při výrobě, kdy vzniká velké množství odpadu, nebo po dožití rámu.

Proces návrhu rámu jízdního kola z kompozitních materiálů se značně liší od procesu návrhu rámu z kovu. Nejprve je třeba zvolit vhodnou technologii výroby, poté vybrat konkrétní materiál a posléze pečlivě navrhnout skladbu kompozitu. Pro uvedení do prodeje, resp. provozu, musí rám splnit zkoušky předepsané normou, která specifikuje nároky i s ohledem na typ kola. V praxi je ale potřeba také najít vhodný kompromis mezi dostatečnou tuhostí, pevností, pohodlím a hmotností. Je třeba vzít v potaz, kdo na rám bude jezdit – jiné nároky bude mít profesionál a jiné rekreační cyklista. Obecně řečeno, proces návrhu rámu jízdního kola z kompozitního materiálu je velmi časově náročný. Tuto časovou náročnost může snadno pozorovat i koncový uživatel – kompozitní rámy se jen zřídka v kolekci mění meziročně. Zpravidla rám zůstává v nabídce několik let a až poté je nahrazen novým.

Rámy z kompozitních materiálů představují nejen současnost, ale i budoucnost – lze očekávat nejen snížení pořizovacích nákladů spojené s urychlením procesu návrhu a vyšším stupněm automatizace výroby, ale také masové použití progresivních materiálů lépe splňujících kladené požadavky jako je např. grafen.

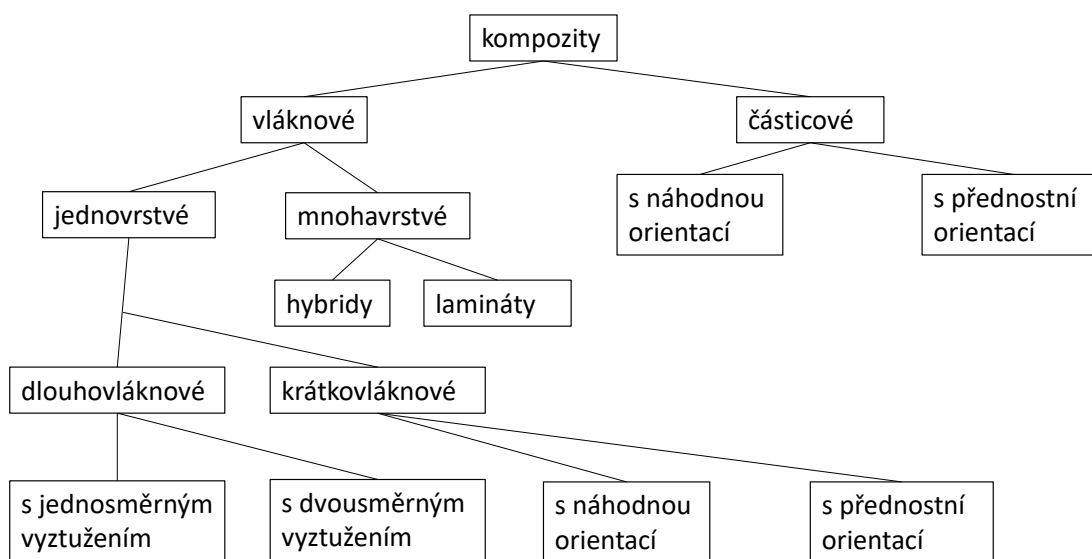
2 CÍLE PRÁCE

Prvním cílem této práce je provést rešeršní studii týkající se kompozitů ve vztahů k výrobě jízdních kol. Dále si práce klade za cíl návrh materiálu a skladby kompozitu pro rám silničního kola. Navržený rám bude posléze na základě numerických simulací analyzován z hlediska pevnosti i tuhosti. Očekávaným výstupem z této práce je pak vyhodnocení výsledků a doporučení pro další práci.

3 REŠERŠE VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PŘI VÝROBĚ RÁMŮ JÍZDNÍCH KOL

3.1 KOMPOZIT

„Kompozit je materiál skládající se ze dvou nebo více částí s rozlišitelným vzájemným rozhraním. Termín lamina označuje vrstvu, laminát více vrstev a hybridní lamináty jsou lamináty složené z materiálů různých vrstev [1].“ Rozdělení kompozitů je znázorněno na obrázku 3.1.

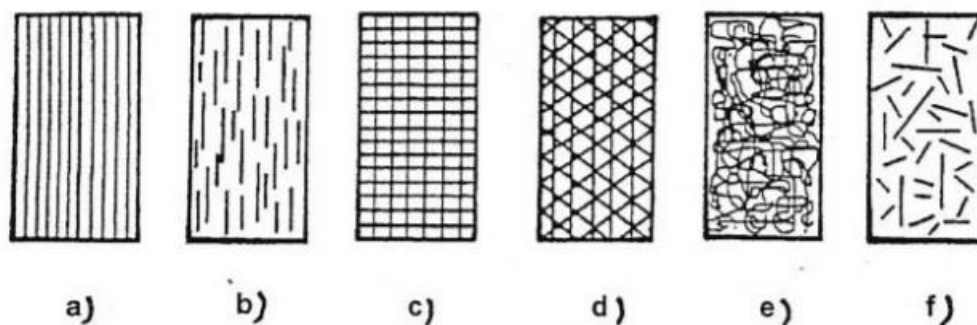


Obrázek 3.1: Rozdělení kompozitů [1]

V cyklistickém průmyslu se využívají vláknové kompozity, proto se tato práce bude věnovat výhradně jim.

3.1.1 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY

Vyztužující vlákna tvoří základ pro přenos zatížení, jejich vlastnosti mají významný vliv na vlastnosti celého kompozitu. „Vlákna mají v porovnání s kompaktem z téhož materiálu ve směru délky mnohem větší pevnost, protože jsou nečistoty minimalizovány v důsledku malých průřezů“ [1]. Používají se nejčastěji vlákna skelná, aramidová (kevlarová), uhlíková, ale i mnoho dalších. Orientační porovnání (pouze pro účely hrubého srovnání) vlastností základních typů vláken z hlediska jejich materiálu je uvedeno v tabulce 1. Charakteristické typy vláknových kompozitů týkajících se uspořádání vláken ve struktuře jsou znázorněny na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Typy vláken z hlediska struktury; a) jednosměrná dlouhá vlákna b) jednosměrná krátká vlákna c) dvousměrné vyztužení d) vícesměrné vyztužení e) náhodná orientace dlouhých vláken f) náhodná orientace krátkých vláken [2]

Tabulka 1: Vlastnosti základních typů vláken z hlediska jejich materiálu [3]

| | Sklo | | Aramid | Uhlík | |
|--|-------|-------|--------|-----------------|-----------------|
| | E^1 | S^2 | | VP ³ | VM ⁴ |
| Hustota [g · cm ⁻³] | 2,54 | 2,46 | 1,45 | 1,76 | 1,8 |
| Modul pružnosti [GPa] | 72 | 87 | 124 | 235 | 338 |
| Mez pevnosti v tahu [MPa] | 3400 | 4600 | 3600 | 3500 | 2480 |
| Specifický modul [GPa · g · cm ³] | 28 | 35 | 85 | 133 | 188 |
| Specifická pevnost [MPa · g · cm ³] | 1340 | 1870 | 2480 | 1990 | 1380 |
| Maximální prodloužení [%] | 4,8 | 5,4 | 2,0 | 1,2 | 0,5 |

V cyklistickém průmyslu jsou nejpoužívanější uhlíková vlákna, proto se práce dále bude zabývat jimi.

¹ E (Electric) skelná vlákna – vlákna vhodná jako elektroizolační materiál, levnější výroba [4].

² S (Strength) skelná vlákna – vlákna s velmi dobrými pevnostními charakteristikami [5].

³ VP – vlákna s vysokou pevností v tahu. Rozdělení uhlíkových vláken a jejich vlastnosti podrobně uvedeny v tabulce 2.

⁴ VM – vlákna s vysokým modulem pružnosti v tahu. Rozdělení uhlíkových vláken a jejich vlastnosti podrobně uvedeny v tabulce 2.

3.1.2 UHLÍKOVÁ VLÁKNA

V současnosti jsou nejpoužívanější polyakrylonitrilová (PAN) vlákna [6]. Výchozí surovinou pro výrobu PAN vláken je akrylonitril. Polymerizací vznikne z akrylonitrilu PAN pryskyřice, která je následně spřádána. Spřádání může být buď suché, nebo mokré. Při suchém spřádání se rozpouštědlo, ve kterém je PAN pryskyřice umístěna, vypařuje ve spřádacím zařízení, přičemž rychlost odpařování rozpouštědla je větší než difúze uvnitř vláken. Povrch vláken tak tuhne rychleji než vnitřek, což vede k nepravidelnostem v průřezu. Při mokrému spřádání se vlákna vysušují rovnoměrně a průřez má tedy pravidelnou strukturu (soustředné kružnice). Po spřádání následuje prodlužování, které vede k nárůstu délky o 500–1300 %. Vlákna jsou poté stabilizována – pomalu ohřívána v oxidačním prostředí za zvýšeného tlaku při 200–300 °C. Vlákna v tomto stavu se již nemohou roztavit, čímž je zamezeno slepování vláken. Následuje proces karbonizace při 1000–1500 °C, který obvykle probíhá v inertní atmosféře tvořené dusíkem. Finální úpravu tvoří grafitizace (až do 3000 °C), pomocí níž je možné zvýšit mez pevnosti v tahu. Konečný průměr vlákna se pohybuje mezi 5–10 μm .

Méně často se pak používají uhlíková vlákna vzniklá zpracováním smoly. Smola vzniká destilací uhelného dehtu nebo olejů obsahující až 60% uhlíku. Smola se reformuje a rafinuje, čímž vznikne dle použité technologie buď izotropní nebo anizotropní smola. Následný proces výroby je obdobný jako u PAN vláken – dochází k spřádání, oxidaci, karbonizaci a grafitizaci. Vlákna z izotropní smoly mají nižší výrobní náklady, avšak horší mechanické vlastnosti. Vlákna z anizotropní smoly mají vyšší výrobní náklady, ale dosahují lepších mechanických vlastností.

3.1.3 TYPY UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Komerční výroba uhlíkových vláken byla zahájena v 70. letech minulého století v Japonsku [7]. Japonsko se od té doby drží stále na špičce produkce, co se objemu i kvality týká. V Japonsku také pod záštitou Japonské asociace výrobců uhlíkových vláken (The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association = JCFA) vznikla standardizace značení uhlíkových vláken na základě jejich vlastností (viz tabulka 2). Při standardizaci se vychází z hodnot pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu.

Tabulka 2: Typy uhlíkových vláken a jejich vlastnosti [7]

| Typ uhlíkového vlákna | Zkratka | Modul pružnosti v tahu [GPa] | Mez pevnosti v tahu [MPa] |
|------------------------------|---------|------------------------------|---------------------------|
| Ultra high elastic modulus | UHM | > 600 | 2500–3500 |
| High elastic modulus | HM | 350–600 | 2500–3500 |
| Intermediate elastic modulus | IM | 280–350 | >3500 |
| Standard elastic modulus | HT | 200–280 | 2500–3500 |
| Low elastic modulus | LM | <200 | <3500 |

3.1.4 MATRICE

Zatímco nosnou část vláknového kompozitu tvoří vlákna, celistvost tělesa z kompozitu zajišťuje matrice [8]. Jejím dalším úkolem je zprostředkování zatížení vláken v místě vnějšího zatížení, v místech přerušení vláken, mezi vlákny u krátkovláknových kompozitů a mezi vlákny nerovnoměrně zatíženými. Matrice se dále stará o přemostění případné trhliny ve vláknech a vytváří vnější povrch tělesa. Největším mechanickým požadavkem na matici je dobrá adheze k výztuži (vláknům) a dobrá mezní tažnost. Obecně může být matrice kovová či nekovová. V cyklistickém průmyslu se používá matrice nekovová, konkrétně organické materiály – polymery.

Polymery se dělí na dvě základní skupiny – termosety a termoplasty. Termosety zůstávají v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jejich odolnost proti creepu a vyšším teplotám. Při procesu vytvrzování vzniká tuhá prostorová polymerní síť. Mechanické vlastnosti vybraných termosetů jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti vybraných termosetů [8]

| | ρ [kg · m ⁻³] | E_t [GPa] | σ_{pt} [MPa] | $\varepsilon_{m,krit}$ [%] |
|----------------------|--------------------------------|-------------|---------------------|----------------------------|
| Epoxydová pryskyřice | 1100–1400 | 2,1–6 | 35–90 | 1–10 |
| Polyestery | 1100–1500 | 1,3–4,5 | 45–85 | 1–5 |
| Fenolické pryskyřice | 1300 | 4,4 | 50–60 | 1–3 |
| Polyimidy | 1200–1900 | 3,0–3,1 | 80–190 | 2–40 |

Termoplasty jsou po vytvrzení tuhé látky, při zvýšení teploty nad teplotu kritickou však měknou a tečou. Po ochlazení znovu ztuhnou. Struktura je tvořena dlouhými lineárními molekulami vytvořenými opakováním stejných stavebních jednotek. V termoplastech se častěji vyskytují různé defekty (např. bubliny, nesmočené pramence vláken) v důsledku velké viskozity při zpracování. Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů [8]

| | ρ [kg · m ⁻³] | E_t [GPa] | σ_{pt} [MPa] | $\varepsilon_{m,krit}$ [%] |
|--------------|--------------------------------|-------------|---------------------|----------------------------|
| Polypropylen | 900 | 1,1–1,5 | 28–41 | 10–700 |
| Polyamid | 1420 | 2,4–2,8 | 76–83 | 60–300 |
| Polykarbonát | 1210 | 2,1–2,8 | 62–76 | 110–130 |
| Polyether | 1310 | 3,8 | 70 | 50–130 |

Termoplasty se využívají u částicových kompozitů, u vláknových kompozitů převládají termosety.

3.2 VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

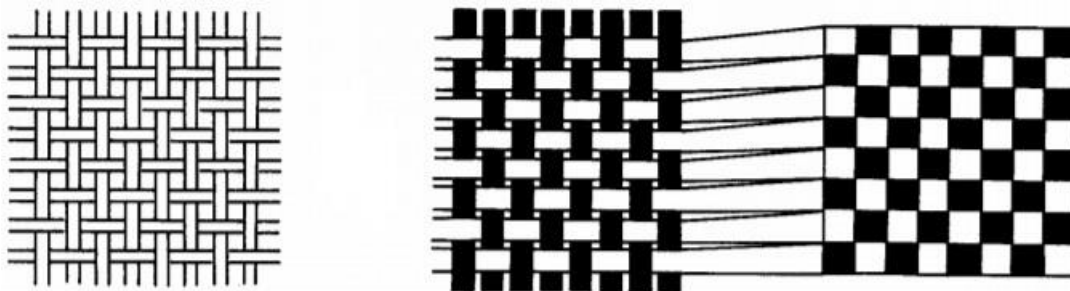
Volba výrobního procesu z technického hlediska se odvíjí od volby výztuže a matrice, teploty potřebné ke zformování součásti a vytvrzení matrice [9]. Velmi důležitou roli však hraje také hledisko ekonomické, neboť se musí zvážit počáteční náklady, objem výroby, rychlost výroby a v neposlední řadě přiměřenost použité technologie. Toto jsou důvody, proč je výrobní proces často počáteční úvahou při tvorbě kompozitní součásti. Výroba kompozitních materiálů obecně obsahuje tyto kroky:

1. Kladení vláken do formy dle požadované orientace
2. Impregnace vláken pryskyřicí
3. Konsolidace naimpregnovaných vláken vedoucí k odstranění přebytků pryskyřice, vzduchu a těkavých látek
4. Vytvrzení nebo tuhnutí polymeru
5. Vyjmutí z formy
6. Dokončovací operace

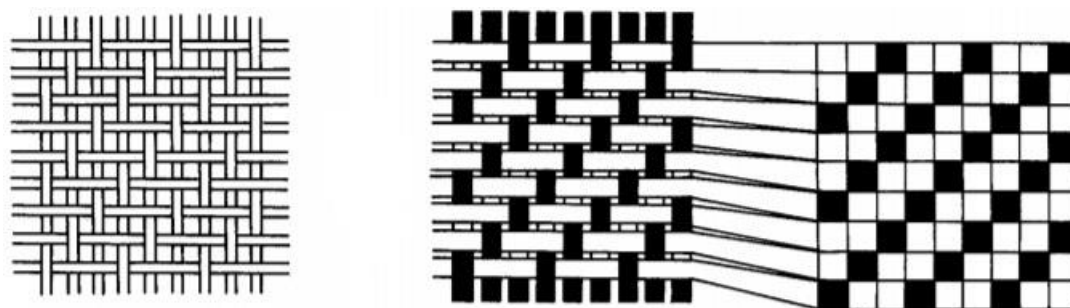
3.2.1 RUČNÍ VRSTVENÍ

Proces ručního vrstvení, někdy nazývaný tzv. mokré vrstvení (z anglického wet lay-up) je, co se týká výrobních technologií, nejjednodušším.

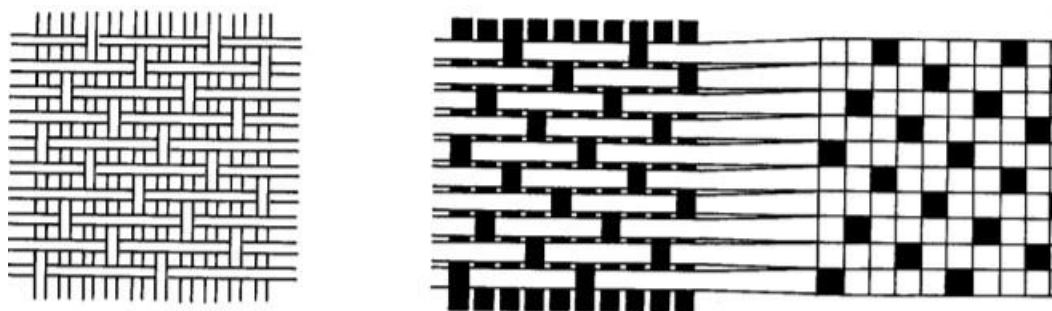
Uhlíková vlákna mohou být dodávána nasekaná, jako „nekonečné“ vlákno, pramenec (1000–10000 vláken navinutých na cívku), jednosměrný pás, jednosměrná látka nebo tkanina [1]. Tkaniny se dále dělí podle vazeb – mezi základní typy patří plátnová (viz obrázek 3.3), keprová (viz obrázek 3.4) a saténová (viz obrázek 3.5).



Obrázek 3.3: Plátnová vazba [1]



Obrázek 3.4: Krepová vazba [1]



Obrázek 3.5: Saténová vazba [1]

Surová uhlíková vlákna v jednom z výše uvedených stavů tvořící jednu vrstvu se ručně kladou do formy a následně je na ně aplikována pryskyřice, která je předem smíchána s katalyzátory [9]. Poté je mokřý kompozit ručně válcován válečky, což zajistí rovnoměrnou distribuci pryskyřice a odstranění vzduchových kapes. Takto se postupuje opakovaně, dokud nejsou nanесeny všechny vrstvy. Následné vytvrzování se obvykle provádí za pokojové teploty. Důležitou roli v tomto procesu hraje příprava formy – na její povrch je nutné nanést krycí vrstvu, která usnadňuje pozdější vyjmutí z formy. Tuto vrstvu může tvořit vosk, polyvinylalkohol, silikon nebo speciální typ papíru. Volba závisí na typu formovaného materiálu a také požadované kvalitě povrchu konečného produktu. Formy v cyklistickém průmyslu jsou uvažovány jako trvalé a jsou vyrobeny z kovů.

Výhody a nevýhody procesu ručního vrstvení jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Výhody a nevýhody procesu ručního vrstvení [9]

| Výhody | Nevýhody |
|---|---|
| Možno vyrobiť veľké výrobky se složitými tvary | Jenom jeden povrch součástí může být hladký |
| Nízké náklady na potřebné vybavení | Kvalita výrobku se odvíjí od zkušenosti pracovníků |
| Objem dutin menší než 1 % | Náročné na práci |
| Možnost snadného umístění vložek či výztuží | Uvolňování velkého množství těkavých látek |
| Lze snadno vyrobiť hladký povrch | Při výrobě více kusů je těžké držet striktně jednotnost |
| Není třeba vytvrzovat za zvýšené teploty – netřeba pecí | Vytvrzení za pokojové teploty je časově náročné |

V současné době je již v určitých případech možná částečná automatizace tohoto výrobního procesu – vlákna jsou nasekána a současně s pryskyřicí stříkána do formy. Proces nástřiku je však stále řízen lidskou silou a kvalita konečného výrobku se tedy opět odvíjí od zkušeností pracovníků. Výsledné mechanické vlastnosti finálního produktu jsou obvykle horší a stejně jako u čistě ručního vrstvení je obtížné držet při výrobě více kusů jednotnost. Navíc je třeba k celkovým výrobním nákladům přičíst náklady na speciální stříkací pistole a další nástroje.

Byla vyzkoušena již i kompletní automatizace procesu, ale ukázala se býti velmi nákladnou a neefektivní.

3.2.2 VRSTVENÍ PREPREGU

Uhlíková vlákna se však často dodávají již předpřipravená k výrobě – ve formě prepregu. Prepreg (z anglického preimpregnated) je materiál, ve kterém jsou vlákna již předimpregnována pryskyřicí, přičemž pryskyřice je částečně vytvrzena. Vlákna jsou uspořádána do jednosměrného pásu, tkaniny nebo náhodně nasekána [9]. Předimpregnovaná vlákna jsou v matrici umístěna tak, že tvoří jednu vrstvu, která je umístěna na nosné fólii zabraňující shlukování vláken a usnadňující manipulaci [1]. Ve většině aplikací býval obsah pryskyřice v prepregu větší, než je požadováno u finálního produktu. Toto bylo nebezpečné, protože při následném odstraňování přebytků pryskyřice je zároveň odstraňován z kompozitu vzduch a těkavé látky, což může způsobovat následnou tvorbu dutin [9]. Dutiny jsou pro kompozity velkým nebezpečím, neboť pokud dutiny tvoří pouhé 1 % objemu, způsobí to pokles interlaminární pevnosti ve stříhu o 7 %. Při objemu dutin nad 2 % tělesa dochází také k poklesu mezi pevnosti v tlaku. U moderních prepregů je však již zajištěna vysoká přesnost, co se množství pryskyřice týká. Toto je výhodné nejen z hlediska finančních nákladů, ale také z hlediska hmotnostních úspor výrobku.

Prepreg se obvykle dodává v rolích o standardních šířkách 30–60 cm. Protože pryskyřice je již částečně vytvrzena, má prepreg omezené možnosti skladování. Jeho trvanlivost však lze prodloužit skladováním v mrazu.

Samotný výrobní proces využívající prepreg je jednoduchý – vrstva prepregu se nanese do formy, na které je krycí vrstva, a sejme se nosná fólie. Po sejmutí nosné fólie se proces opakuje až do dosažení požadovaného počtu vrstev.

3.2.3 BAG MOLDING – METODA VAKUOVÉHO PROSYCOVÁNÍ

Metoda je modifikací metody ručního vrstvení [9]. V poslední fázi vrstvení je na povrch položen tenký vzduchotěsný film. Kompozit umístěný pod tímto filmem je následně vakuován. Atmosferický tlak aplikovaný na laminát před jeho vytvrzením zlepšuje konsolidaci vláken a odstraňování přebytečné pryskyřice, vzduchu a těkavých látek z matrice. Součástí je poté vytvrzení teplem a tlakem.

3.2.4 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU

Autoklávy jsou tlakové nádoby, které během zpracování obsahují stlačený plyn [9]. Metoda vytvrzování v autoklávu je modifikací metody vakuového prosycování. Kompozitní součást je navrstvena a uzavřena do vaku, ve kterém je dosaženo plného nebo částečného vakua. Z vnější strany působí na vak tlak větší než atmosferický. Tento tlak vyvíjí mechanické síly na nekonsolidovaný kompozit, napomáhá transportu těkavých látek směrem ven z kompozitu a umožňuje lepší tok pryskyřice. Následně je zvýšena teplota, což vede k vytvrzení. Vysoká teplota

také snižuje viskozitu polymeru, napomáhá navlhčení vláken a konsolidaci kompozitu. Autoklávy jsou velmi drahé a jejich provoz je energeticky náročný. Vytvrzení menších částí trvá tři až čtyři hodiny, větších až šestnáct hodin.

3.2.5 COMPRESSION MOLDING (CM) – METODA LISOVÁNÍ

CM je jednoduchá a osvědčená metoda, navíc je také ekonomicky výhodná – eliminuje plýtvání s materiálem, má nižší nároky na sekundární dokončování výrobku a vyžaduje jen minimální množství práce, neboť proces lze snadno automatizovat [9].

Při CM se využívají dva typy směsí – Sheet Molding Compound (SMC) a Bulk Molding Compound (BMC). SMC a BMC jsou pryskyřičné směsi obsahující inertní plniva, vláknové výztuže, katalyzátory, pigmenty, stabilizátory aj. SMC má delší vlákna a vyšší obsah vláken než BMC.

Výrobní proces SMC a BMC se liší. U SMC se základní složky směsi smíchají a nanese na dvě nosné fólie [10]. Na jednu z nich se následně nasekají vlákna. Na fólii s vlákny se umístí druhá fólie, čímž vznikne jakýsi „sendvič“. Tento „sendvič“ prochází válci, které ho uválčují na požadovanou tloušťku a především zajistí impregnaci vláken. Následně putuje do pece, kde dojde k vytvrzení. U BMC je proces jednodušší – všechny složky směsi včetně vláken se roze-melou a vzniklá hmota se naleje do formy, kde se poté vytvrdí.

3.2.6 RESIN TRANSFER MOLDING (RTM) – METODA LISOVÁNÍ SE VSTŘIKEM MATRICE

Metodou RTM se vyrábí velké kompozity s kontinuálními vlákny s komplikovanými tvary [9]. Proces se odlišuje od ostatních tím, že veškerá výztuž je do formy umístěna suchá ještě předtím, než je aplikována pryskyřice. Toto umožňuje lepší kontrolu orientace vláken a tím pádem lepší materiálové vlastnosti. Při RTM také dochází jen k poměrně malému uvolňování těkavých látek, výrobky jsou méně náchylné k defektům.

Metoda pracuje s uzavřenou formou se vstupy a výstupy pro zavedení pryskyřice. Výztuž se suchá umístí do formy a forma se uzavře (působí se na ni tlakem). Tekutá pryskyřice je následně vtlačena vstupy do formy, čímž dochází k impregnaci vláken a vyplnění dutin. Po naplnění formy začne pryskyřice vytékat výstupy ven. Přívod pryskyřice se uzavře, vstupy a výstupy formy se utěsní. K vytvrzení dochází při pokojové teplotě, případně je dutina uvnitř vyhřívána na 40–60 °C. Po vytvrzení se forma otevře a součást je vyjmuta.

Protože se vytvrzování provádí zpravidla při pokojové teplotě, je možno použít levnější formy než ocelové. Využívá se forem ze dřeva nebo pryskyřice.

3.2.7 VACUUM ASSISTED RESIN TRANSFER MOLDING (VARTM)

VARTM je modifikací metody RTM [9]. Rozdíl spočívá v tom, že pryskyřice impregnující vlákna je do formy vtahována vakuem. Díky této úpravě může být půlka formy nahrazena vakuovým vakem. Tlak působící na impregnovanou výztuž je způsoben tlakovým rozdílem mezi

působícím vakuem a atmosferickým tlakem působícím na povrch vakuového vaku umístěného na kompozitu. Tok pryskyřice může být podpořen mikrodrážkami zabudovanými do formy.

3.2.8 PULTRUZE

Pultruze je nepřetržitý výrobní proces používaný k výrobě konstantních průřezů jakékoliv délky [9]. Svazky vláken jsou taženy pryskyřičnou lázní, kde dochází k jejich impregnaci. Naimpregnovaná vlákna následně prochází tvarovacím průvlakem, kde dochází k tvarování patřičného průřezu. K vytvrzení posléze dochází v kontinuální vytvrzovací hlavě. Za vytvrzovací hlavou probíhá řezání profilu na požadovanou délku.

Výhodou této metody jsou rychlost a minimální nároky na lidskou práci. Nevýhodou je drahý provoz a vysoká prvotní investice do pořízení strojů.

3.2.9 NAVÍJENÍ

Navíjení se používá na výrobu velkých dutých součástí jako jsou například trubky nebo kolena [9]. Proces navíjení začíná tím, že do rotačního stroje se upne jádro, které je po vytvrzení buď vyjmuto, nebo zůstává součástí výrobku. Nejlevnější možná forma výztuže, roving, je odvíjen z cívek a následně prochází pryskyřičnou lázní, čímž dojde k impregnaci. Naimpregnovaná vlákna jsou poté v požadované orientaci navinuta na jádro. Kompozit se následně vytvrzuje za neustále rotace jádra.

Výhodou tohoto procesu je jeho snadná automatizace, nevýhodou pak vysoké pořizovací náklady.

3.3 TECHNOLOGIE POUŽÍVANÉ PŘI VÝROBĚ KOMPOZITOVÝCH RÁMŮ JÍZDNÍCH KOL

V této kapitole jsou představeny tři nejpoužívanější technologie používané při výrobě kompozitových rámců jízdních kol. Jedná se o technologii Monocoque, Tube to Tube a technologii využívající spojky. V cyklistickém průmyslu se lze sporadicky setkat i s jinými technologiemi (např. u české firmy Duratec), nicméně vzhledem k minimálnímu zastoupení na trhu tyto speciální technologie nebudou v této práci rozebírány.

3.3.1 TECHNOLOGIE MONOCOQUE

Monocoque rám v cyklistickém průmyslu znamená, že rám je tvořen jedním kusem [11]. Reálně jsou však Monocoque rámy velmi vzácné, neboť z technologického hlediska je výroba velmi náročná. Zpravidla se setkáváme s rámy, které mají z jednoho kusu pouze přední trojúhelník, k němuž jsou následně připojeny řetězové a sedlové vzpěry. Výrobci tuto technologii nazývají Monocoque, ale kdyby měla být terminologie naprosto korektní, měly by se nazývat Semi-Monocoque. Semi-Monocoque je nejpoužívanější technologií výroby rámců.

Při výrobě se nejčastěji používá prepreg. Na počátku je prepreg odvíjený z role nastříhán do požadovaného tvaru. Těchto kusů mohou být až stovky (např. rám Specialized Venge se skládá ze 400 kusů [12]). Takto nastříhané kusy se následně podle schématu vrstvení ručně umísťují s ohledem na požadovanou orientaci na jádra, která mají nejčastěji podobu nafouknutelného vzduchového vaku, který se po vytvrzení vytáhne [11]. Další možností jsou pak jádra vosková nebo pěnová, která se posléze vytaví. Občas se lze setkat i s jádry plastovými, kovovými a dřevěnými, ale zde už musí být tvar trubek přizpůsoben tomuto jádru, aby šlo po vytvrzení kompozitu vytáhnout. Jádro se následně umístí do dvoudílné formy. Forma je specifická pro konkrétní model a konkrétní velikost. Tyto formy jsou typicky vyrobeny z hliníkových slitin nebo oceli a jsou určeny pro opakované použití. Vytvrzení je v případě Monocoque (resp. Semi-Monocoque) rámu provedeno zpravidla v autoklávu. Po vytvrzení je rám vyjmut z formy a vyjme se jádro.

Pokud je rám vyroben technologií Semi-Monocoque, následuje připojení řetězových a sedlových vzpěr k rámovému trojúhelníku. Vzpěry mohou být buď přilepeny, nebo jsou spoje překryty dalšími vrstvami prepregu a vytvrzeny. Celá tato montáž se provádí ve speciálním přípravku, aby bylo zajištěno dokonalé vyrovnání.

Celý rám je následně broušen – odstraňují se zejména přebytky pryskyřice, které se vyskytují zejména v místech dělicí roviny formy. Velká pozornost je v případě Semi-Monocoque rámu věnována také spojům. Po broušení se provádí vrtání děr pro šrouby (např. pro šrouby přesmykače, košíky na lahve atd.) a vkládání vložek⁵ pro středové složení, hlavové složení a patky rámu. Poslední fází výroby rámu je lakování.

Čas výroby rámu se pohybuje v řádech hodin – např. americký výrobce Allied uvádí, že čistý čas výroby jednoho jejich rámu je 24 hodin, hrubý pak 10 dnů [13]. Allied je však z pohledu trhu velmi malým výrobcem, a tak se dá předpokládat, že čas výroby u větších výrobců bude kratší.

Výroba technologií Monocoque (resp. Semi-Monocoque) je nejlepší volbou, pokud je cílem dosáhnout velmi dobrých mechanických vlastností, avšak má i své nevýhody. Největší nevýhodou je časová náročnost, přičemž většinu operací prováděnou v tomto čase je potřeba provádět ručně. To je také důvod, proč většina výrobců má své továrny v Asii, kde je levná pracovní síla. Druhou velkou nevýhodou je pak nutnost výroby velkého množství forem. Velcí výrobci mají v nabídce nepřeberné množství typů kol (silniční, gravel, XC, trail, all-mountain, enduro atd.), přičemž každé z těchto kol se vyrábí v několika velikostech, tedy počet forem, které firma musí zakoupit, je vysoký. Toto je důvod, proč výrobci nepřichází každý rok s novým modelem rámu (většina velkých výrobců má životní cyklus modelové řady dva až tři roky).

3.3.2 TECHNOLOGIE TUBE TO TUBE

Pro malé výrobce, zejména ty, kteří se specializují na individuální výrobu rámu (resp. individuální geometrii rámu – úhly a délky trubek), je obtížné až nemožné vyrábět technologií Monocoque (resp. Semi-Monocoque). Tito výrobci často používají technologii zvanou Tube

⁵ V ojedinělých případech u některých výrobců jsou ložiska nalisována přímo do rámu.

to Tube, která se svým principem příliš neliší od způsobu, jakým jsou vyráběny rámy ocelové a titanové [11].

Při technologii Tube to Tube je každá trubka rámu vyrobená samostatně, mnohdy jsou trubky odebírány už hotové od externích výrobců. Trubky se nejčastěji vyrábí metodou pultruze nebo navíjením (popis metod viz podkapitola 3.2). Trubky jsou následně nařezány na požadované rozměry a jejich konce jsou zkoseny tak, aby bezešvě zapadaly do sebe. Spoje jsou poté překryty vrstvami prepregu a vytvrzeny (obdobně jako u Semi-Monocoque rámu). Následují dokončovací operace obdobné jako u Monocoque (resp. Semi-Monocoque) technologie.

3.3.3 TECHNOLOGIE VYUŽÍVAJÍCÍ SPOJKY

Podobně jako rámy vyrobené technologií Tube to Tube jsou rámy využívající spojky tvořené z trubek, které jsou vyráběny samostatně, často z trubek externích výrobců, avšak spoje zde nejsou překryty vrstvami prepregu, nýbrž je využíváno spojek jako u některých ocelových rámu [11]. Spojky mohou být vyrobené z kompozitu (uhlíková vlákna s epoxydovou pryskyřicí), ale také z oceli, titanu nebo hliníkové slitiny. Kovové spojky mohou být vytištěny na 3D tiskárně.

Největší předností rámu se spojkami je podobně jako u rámu Tube to Tube možnost plné individualizace rámu.

Na rozdíl od dvou výše uvedených technologií, využívají tuto výrobci pouze ojediněle. V současné době je jediným rámem používaným ve World Tour⁶ vyrobeným touto technologií rám Colnago C60, kterým disponuje tým United Arab Emirates (UAE) Team Emirates⁷.

⁶ World Tour je seriál silničních závodů nejvyšší úrovně, kterého se zúčastňují týmy spadající do nejvyšší kategorie World Teams a vybrané týmy spadající do kategorie Professional Continental Teams, které obdrží divokou kartu. Seriál je pořádán Union Cycliste Internationale (UCI) [14].

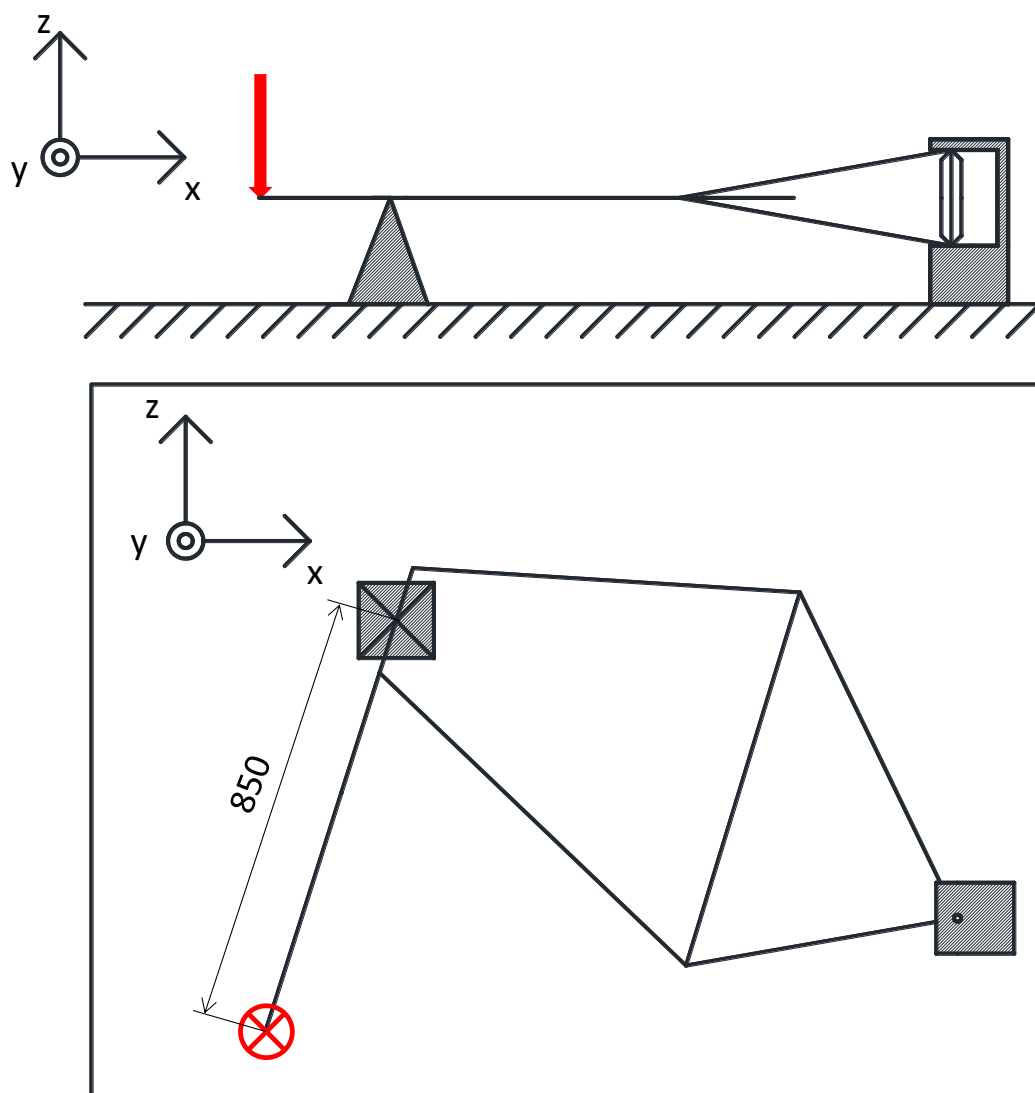
⁷ Druhý název Emirates v názvu týmu je podle hlavního sponzora – letecké společnosti Emirates [15].

4 TUHOSTNÍ ZKOUŠKY RÁMŮ JÍZDNÍCH KOL

Tuhostní zkoušky nejsou na rozdíl od zkoušek pevnostních popsány normou, neboť tuhost rámu nemá přímou souvislost s bezpečným provozem rámu. Tuhost má však významný vliv na efektivitu přenosu sil při šlapání a pro cyklisty je tedy významná. Zkoušení tuhosti rámů se věnuje několik firem, jednou z nejvýznamnějších je německá firma EFBE Prüftechnik GmbH, která má svou pobočku i na Taiwanu, kde vzniká většina světové produkce karbonových rámů. EFBE nabízí v současnosti dvě zkoušky tuhosti – Track holding rigidity a Out of saddle rigidity [16].

4.1 TRACK HOLDING RIGIDITY

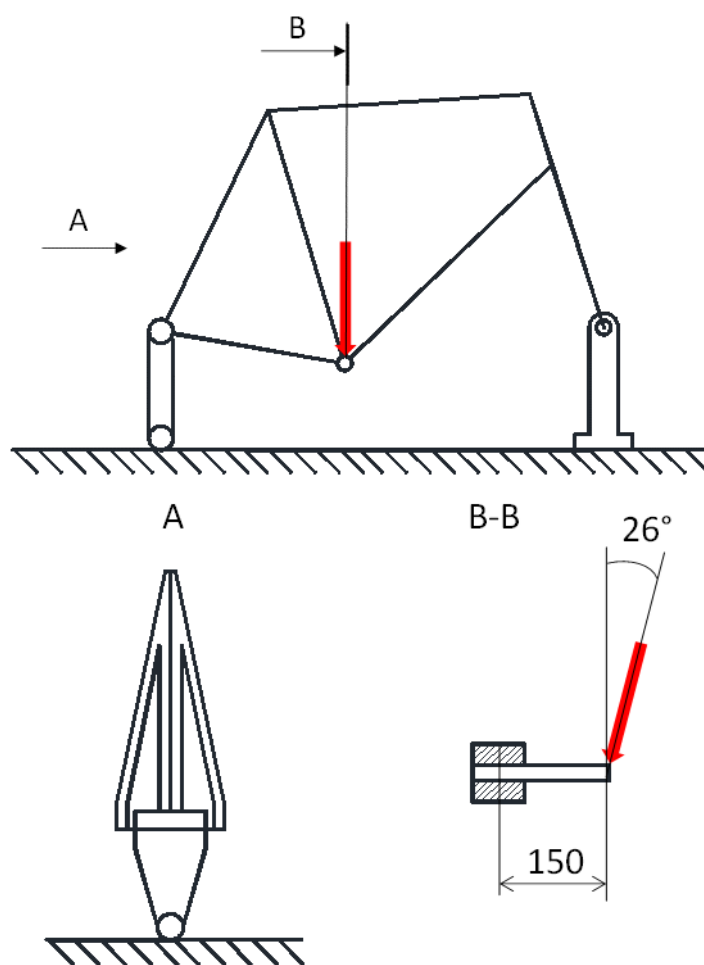
Zkouška má za cíl stanovit torzní tuhost rámu, která ovlivňuje jízdu při vyšších rychlostech [16]. Rám je při ní vzhledem k zemi v horizontální poloze, jak je znázorněno na obrázku 4.1. Rám je uchycen v místě patek prostorovou rotační vazbou a dále je podepřen v polovině hlavové trubky. Zkouška je prováděna s fiktivní ocelovou vidlicí, na jejímž konci je ve vzdálenosti 850 mm od středu hlavové trubky umístěno závaží. V místě uchycení závaží se měří posuv fiktivní ocelové vidlice ve směru kolmém k zemi. Na základě tohoto posuvu je následně vypočítána tuhost.



Obrázek 4.1: Tuhostní zkouška Track holding rigidity [16]

4.2 OUT OF SADDLE RIGIDITY

Zkouška má za cíl stanovit tuhost středu rámu při šlapání ze sedla (tzn. ve stoje) [16]. Rám je při ní upevněn stejně jako při zkoušce silami při šlapání uvedené v podkapitole 5.3. Zkouška se může provést s originální vidlicí příslušející rámu nebo s vidlicí fiktivní. Do oblasti středu je umístěn přípravek, na nějž je ve vzdálenosti 150 mm od roviny symetrie rámu zavedena zatěžující síla pod úhlem 26° (viz obrázek 4.2). V místě působení síly se měří posuv přípravku ve směru kolmém k zemi. Na základě tohoto posuvu je následně vypočítána tuhost.



Obrázek 4.2: Tuhostní zkouška Out of saddle rigidity [16]

5 NORMA DEFINUJÍCÍ BEZPEČNOSTNÍ POŽADAVKY NA JÍZDNÍ KOLA

Bezpečnostní požadavky na jízdní kola předepisuje norma ČSN EN ISO 4210-2 účinná od 1. 5. 2018 [17]. Tato norma je českou verzí evropské normy EN ISO 4210-2:2015. Oproti předchozí platné normě došlo pouze ke změně způsobu převzetí evropské normy do soustavy norem ČSN. Předchozí norma převzala evropskou normu schválením k přímému používání jako ČSN oznámením ve Věstníku Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Aktuální platná norma ji přejímá překladem.

V normě je definováno pět zkoušek, které musí rámy jízdních kol splňovat. Jedná se o zkoušku rázem – padající závaží, zkoušku rázem – padající rám, únavovou (dynamickou) zkoušku silami při šlapání, únavovou (dynamickou) zkoušku vodorovnými silami a únavovou (dynamickou) zkoušku svislou silou.

Výrobci rámů je u některých zkoušek dovoleno použít náhradu přední vidlice (fiktivní zkušební vidlici). Náhrada je v normě přesně definována. Délka náhrady musí být stejná jako nejdelsí skutečná vidlice uvažovaná pro použití se zkoušeným rámem a náhrada dále musí splňovat podmínku maximálního průhybu při následujícím testu. Pro průhybový koeficient D_r musí být při únavové zkoušce vodorovnými silami resp. únavové zkoušce svislou silou splněno:

$$D_r = \frac{10000 \cdot K_1 \cdot \delta}{L^3} \leq 1$$

K_1 [–] – konstanta, $K_1 = 1417$

δ [mm] – průhyb náhrady

L [mm] – délka náhrady

Při zkouškách rázem musí pro průhybový koeficient platit:

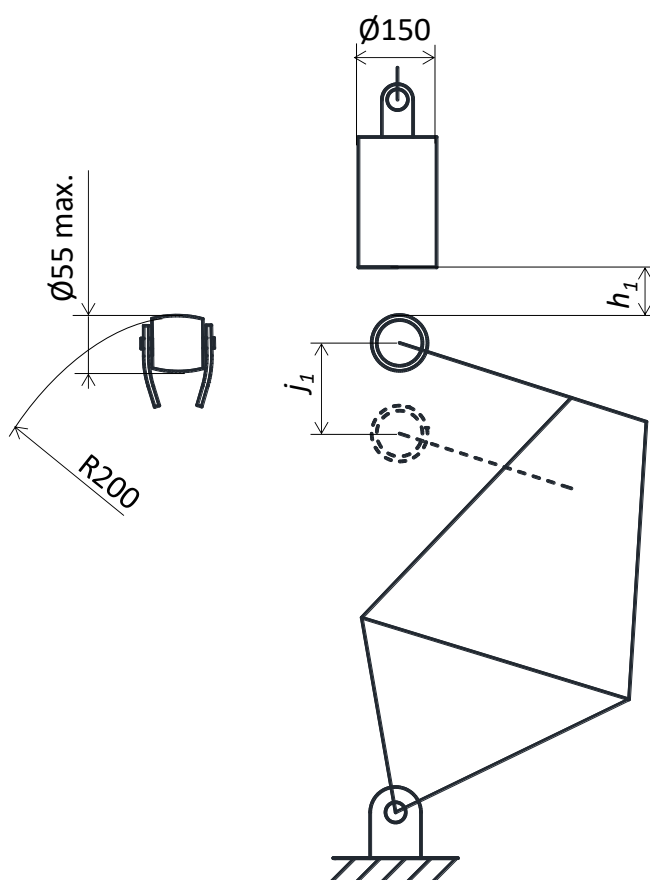
$$D_r = \frac{10000 \cdot K_2 \cdot \delta}{L^3} \leq 1$$

K_2 [–] – konstanta, $K_2 = 709$

5.1 ZKOUŠKA RÁZEM – PADAJÍCÍ ZÁVAŽÍ

Tato zkouška simuluje čelní náraz kola do překážky [17]. Schéma zkoušky je znázorněno na obrázku 5.1. Zadní patky se napevno upnou do přípravku, který zajišťuje, že rám drží ve svislé poloze (vazba prostorového vetknutí). Do patek vidlice se upne váleček o hmotnosti ≤ 1 kg. Tvrdost válečku na dopadových plochách nesmí být menší než 60 HRC. Na upnutý váleček se položí závaží o hmotnosti 22,5 kg a změří se rozvor kola. Následně se závaží zvedne do výšky h_1 , která je specifická pro různé typy kol. Dle klasifikace v normě spadá v této práci navrhovaný rám do kategorie *závodní jízdní kola*, přičemž takovéto je definováno jako „*jízdní kolo, které je určeno pro amatérské vysokorychlostní jízdy na veřejných komunikacích a které*

má sestavu řízení s více polohami úchopu (umožňující aerodynamickou polohu jezdce), více-rychlostní převodový systém, šířku pláště nejvýše 28 mm a maximální hmotnost zcela smontovaného jízdního kola 12 kg “[17]. Pro kolo v této kategorii je $h_1 = 212$ mm. Závaží se z výšky h_1 spustí s rychlostí dosahující alespoň 95 % rychlosti volného pádu ($v_{vp} = \sqrt{2gh_1}$) na vidlici. Opětovné dopadání závaží na vidlici po prvotním nárazu je v souladu s metodikou zkoušky. Jakmile se závaží nachází opět v klidu, je změřen rozvor kola. Aby rám v kategorii *závodní jízdní kolo* prošel zkouškou, nesmí trvalá deformace překročit v případě použití rámu s namontovanou vidlicí $j_1 = 30$ mm a v případě použití fiktivní vidlice $j_1 = 15$ mm. Dále na rámu nesmějí být žádné viditelné trhliny.

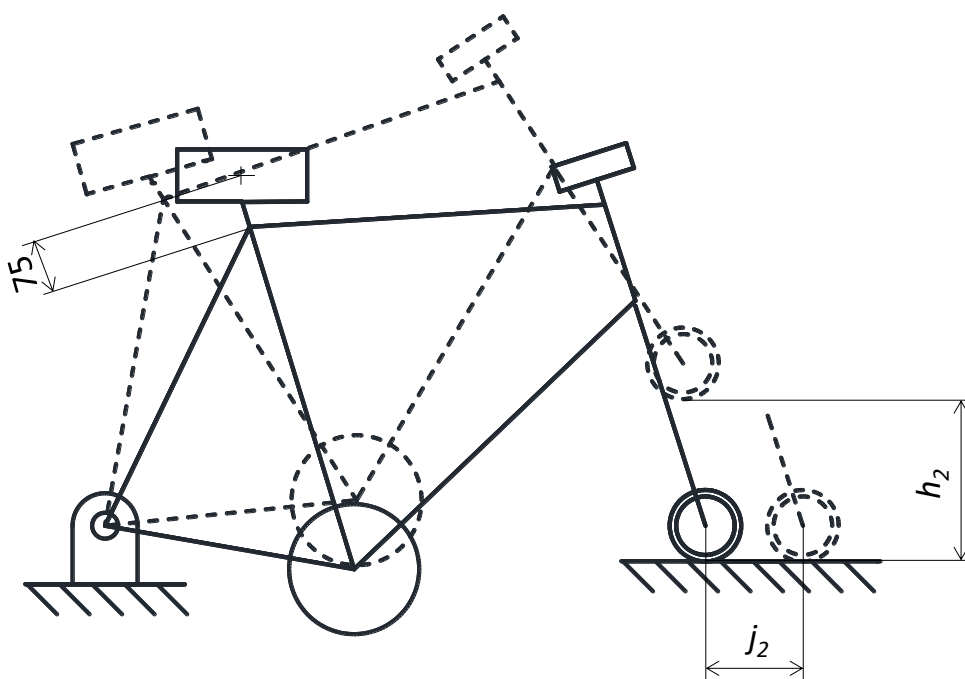


Obrázek 5.1: Zkouška rázem – padající závaží [17]

5.2 ZKOUŠKA RÁZEM – PADAJÍCÍ RÁM

Zkouška simulující skok cyklisty s kolem je znázorněna na obrázku 5.2. Při tomto testu není možné nahradit vidlici fiktivní vidlicí – zkoušku je nutné provést s vidlicí náležící k rámu [17]. Pokud vidlice k danému rámu není dostupná, je přípustné provést zkoušku s vidlicí jinou, která však musí projít zkouškou vidlic popsanou v ISO 4210-2:2015 (4.8.2). Sestava rámu s vidlicí je uchycena v místě patek rámu prostorovou rotační vazbou. Přední vidlice, ve které je upnut váleček stejně jako v podkapitole 5.1, je opřena o kovadlinu (obecná kinematická dvojice v prostoru). Na sedlovku se ve výšce $E = 75$ mm měřené od jejího ústí z rámu umístí závaží

o hmotnosti M_1 , na horní konec hlavové trubky se umístí závaží o hmotnosti M_2 a v místě středového složení se umístí závaží o hmotnosti M_3 . Pro *závodní jízdní kolo* norma předepisuje hmotnosti $M_1 = 30$ kg, $M_2 = 10$ kg a $M_3 = 50$ kg. Tyto hmotnosti mají simulovat silové působení cyklisty na rám s vidlicí. Jakmile jsou na sestavě umístěna závaží, změří se rozvor kola. Následně se sestava orotuje kolem uchycení v zadních patkách tak, že se váleček v přední vidlici nadzvedne do výšky $h_2 = 200$ mm. Sestava se následně nechá volným pádem dopadnout na kovadlinu, opět se zvedne do výšky h_2 a nechá se podruhé volným pádem dopadnout na kovadlinu. Po druhém dopadu se změří rozvor a porovná se s hodnotou naměřenou při prvotním měření (před dopady). Trvalá deformace rozvoru při této zkoušce pro *závodní jízdní kola* nesmí překročit $j_2 = 15$ mm a zároveň se nesmějí na sestavě objevit žádné viditelné trhliny.



Obrázek 5.2: Zkouška rázem - padající rám [17]

5.3 ÚNAVOVÁ (DYNAMICKÁ) ZKOUŠKA SILAMI PŘI ŠLAPÁNÍ

Zkouška má za cíl simulovat stochastické zatížení rámu s vidlicí, ke kterému dochází v průběhu jízdy např. v důsledku nerovností povrchu [17]. Zkouška se může provést s originální vidlicí příslušející rámu nebo s vidlicí fiktivní, která má stejnou nebo větší tuhost jako ta originální. Protože u originální vidlice je možné, že v průběhu testu dojde k jejímu selhání a protože tato zkouška si klade za cíl prověřit pouze rám, je normou doporučeno použít vidlici fiktivní.

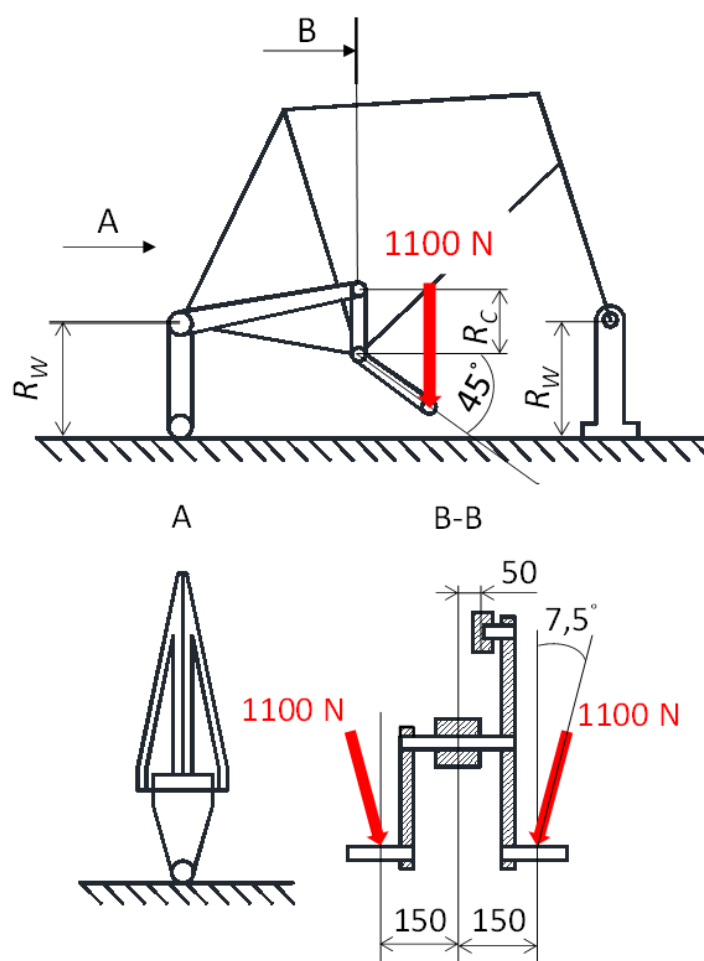
Sestava rámu s vidlicí je uchycena k patkám rámu ve výšce R_w , což je výška, ve které se rám s vidlicí nachází, jsou-li v něm usazena kola (viz obrázek 5.3). U hodnoty R_w je přípustná odchylka ± 30 mm. V místě patek vidlice je sestava uchycena prostorovou rotační vazbou. V místě patek rámu je sestava uchycena prostorovou rotační vazbou k mezičládku, který je spojen s podložkou sférickou vazbou. Na rám se umístí kliky s převodníkem (resp. převodníky) a řetězem nebo jejich náhrada.

Pokud jsou použity kliky s převodníky, otočí se obě kliky do polohy, kdy se nachází v „záběrové“ části pomyslného kruhu vzniklého při šlapání a kdy s podložkou svírají úhel 45° . Je přípustná odchylka $\pm 2^\circ$. Řetěz se umístí na převodník. Pokud je osazen trojpřevodník, umístí se řetěz na prostřední převodník, pokud dvoupřevodník, umístí se řetěz na převodník menší. Následně se řetěz uchytí k mezičlátku, který byl vložen do patek rámu a to tak, aby byl při pohledu zhora rovnoběžně s rámem.

Pokud je použita náhrada klik, převodníků a řetězu, je především nutné zajistit, aby vazba mezi rámem a touto náhradou byla prostorová rotační. Části náhrady představující kliky musí mít délku $K = 175$ mm, část náhrady představující převodníky má délku $R_c = 75$ mm. Náhradu je nutné natočit do stejné polohy jako v případě, kdy jsou použity skutečné komponenty. Řetěz je nahrazen spojovací tyčí, která je na jednom konci uchycena k náhradě převodníků a na druhém k mezičlátku vloženému do patek rámu. Na obou koncích je spojení realizováno sférickou vazbou. Při pohledu zhora musí být spojovací tyč rovnoběžně s rámem.

Do náhrady středového složení (resp. do skutečných klik) se našroubují osy pedálů, které však mohou být nahrazeny libovolnými komponentami, které splní jejich funkci – působí se na ně silou $F_1 = 1100$ N (hodnota pro *závodní jízdní kola*) pod úhlem $7,5^\circ$ s přesností $\pm 0,5^\circ$, jak je znázorněno na obrázku 5.3. Síla se aplikuje střídavě na obě osy (resp. jejich náhrady) a to tak, že na nezatíženou osu se může začít působit silou teprve ve chvíli, kdy na zatížené ose dosáhne zátěžná síla hodnoty $\leq 0,05 F_1$. Počet cyklů je 100000, přičemž jeden cyklus se skládá z působení silou na jednu a posléze i druhou osu (resp. její náhradu). Síla se má dle normy aplikovat a uvolňovat postupně, frekvence nesmí překročit 10 Hz.

Po provedení zkoušky nesmějí být na žádné části rámu viditelné trhliny. U rámu z kompozitu se navíc po 1000 cyklech a před 2000 cykly kontrolují špičkové hodnoty průhybu v místech, kde působí zátěžné síly. Tyto hodnoty se nesmějí zvýšit o více než 20% oproti počátečním hodnotám.

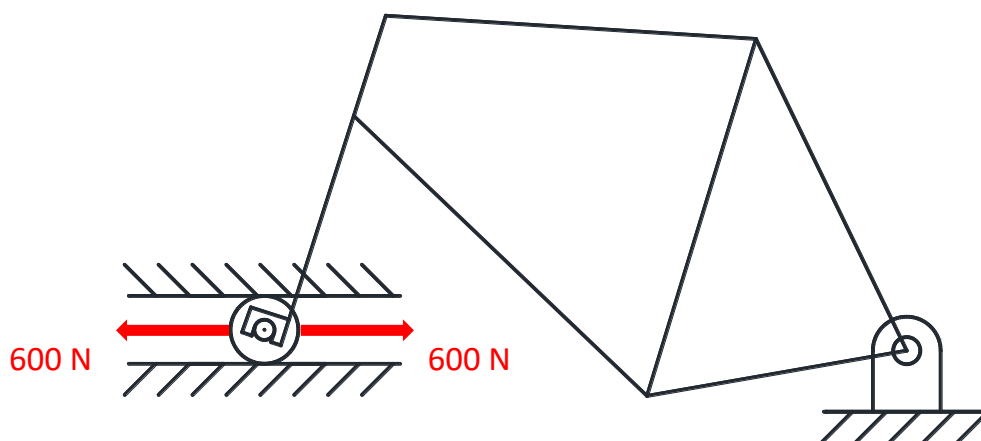


Obrázek 5.3: Únavová (dynamická) zkouška silami při šlapání [17]

5.4 ÚNAVOVÁ (DYNAMICKÁ) ZKOUŠKA VODOROVNÝMI SILAMI

Zkouška představuje jistý únavový ekvivalent zkoušky rázem padajícím závažím [17]. Při zkoušce není nutné použít originální vidlici – je možné použít vidlici fiktivní. Sestava rámu s vidlicí je uchycena v místě patek rámu prostorovou rotační vazbou a v místě patek vidlice prostorově rotačně posuvnou vazbou (do patek vidlice je umístěn váleček). Na rám se aplikují vodorovně zkušební síly $F_2 = F_3 = 600$ N tak, jak je zobrazeno na obrázku 5.4. Počet cyklů je 100000, přičemž jeden cyklus se skládá z působení silou F_2 a posléze F_3 (symetrický střídavý cyklus). Veškeré zde uvedené hodnoty platí pro *závodní jízdní kola*. Síla se má dle normy aplikovat a uvolňovat postupně, frekvence nesmí překročit 10 Hz.

Po provedení zkoušky nesmějí být na žádné části rámu viditelné trhliny. U rámu z kompozitu se navíc po 1000 cyklech a před 2000 cykly kontrolují špičkové hodnoty průhybu v místech, kde působí zátěžné síly. Tyto hodnoty se nesmějí zvýšit o více než 20 % oproti počátečním hodnotám.



Obrázek 5.4: Únavová (dynamická) zkouška vodorovnými silami [17]

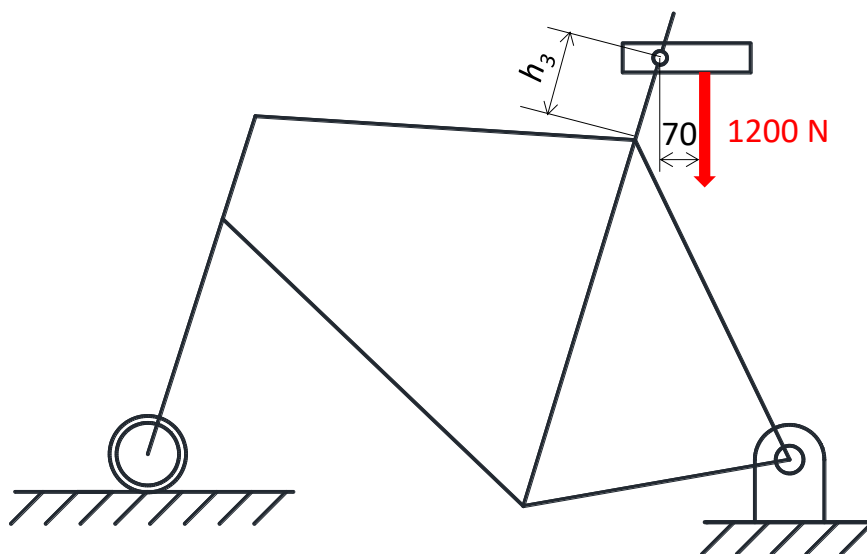
5.5 ÚNAVOVÁ (DYNAMICKÁ) ZKOUŠKA SVISLOU SILOU

Zkouška simulující zatížení rámu cyklistou sedícím v sedle je znázorněna na obrázku 5.5.

Sestava rámu s vidlicí je uchycena v místě patek rámu prostorovou rotační vazbou [17]. Do patek vidlice se umístí váleček, který se opírá o podložku (obecná kinematická dvojice v prostoru). Do rámu se vloží adekvátní sedlovka, zasune se pouze minimálně (minimální dovolená hranice) nebo se zasune 75 mm do rámu a zajistí se objímkou. Objímka se utáhne na požadovaný moment. Na sedlovku se ve vzdálenosti, kterou výrobce udává jako maximální vysunutí sedlovky pro daný rám, umístí horizontálně náhrada simulující sedlo. Pokud výrobce rámu maximální vysunutí sedlovky pro daný rám nepředepíše, uvažuje se hodnota $h_3 = 250$ mm měřená po délce sedlové trubky od objímky.

Na náhradu sedla se ve vzdálenosti 70 mm vertikálně od uchycení náhrady působí silou $F_4 = 1200$ N (hodnota pro závodní jízdní kola). Testovacích cyklů je 50000 (míjivý cyklus). Síla se má dle normy aplikovat a uvolňovat postupně, frekvence nesmí překročit 10 Hz.

Po provedení zkoušky nesmějí být na žádné části rámu viditelné trhliny. U rámu z kompozitu se navíc po 1000 cyklech a před 2000 cykly kontrolují špičkové hodnoty průhybu v místech, kde působí zátěžné síly. Tyto hodnoty se nesmějí zvýšit o více než 20 % oproti počátečním hodnotám.



Obrázek 5.5: Únavová (dynamická) zkouška svislou silou [17]

6 NÁVRH RÁMU SILNIČNÍHO KOLA

6.1 TVORBA MODELU

Při tvorbě modelu byl využit program *Catia* ve verzi *V5R20*. Byla modelována vnější plocha rámu – kompozit byl později vrstven směrem „dovnitř“. Volnou předlohou rámu, ze které se vycházelo, co se týká geometrie, se stalo silniční kolo Kross Vento TE [18]. Při modelování jednotlivých trubek byla využita funkce *Sweep*, resp. *Extrude*, při ořezávání trubek byla využita funkce *Split*, resp. *Trim*. Následné spojení trubek dohromady umožnila funkce *Join*. Kvůli zkoušce rázem s padajícím rámem (viz podkapitola 5.2) bylo nutné domodelovat k rámu i vidlici. Pro tvorbu její poměrně složité geometrie posloužila funkce *Multi-section Surface*. Po importu do programu *ANSYS* ve verzi *2019 R3* (licence *Academic Teaching*) byla ještě geometrie v místech, kde to bylo možné, upravena pomocí funkce *Merge Faces*, kterou nabízí prostředí pro práci s geometrií *SpaceClaim*.

6.2 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

Na základě úvodní rešerše bylo rozhodnuto, že rám bude vyráběn procesem vrstvení prepregu složeného z uhlíkových vláken a polymerové matrice. Konkrétně byl použit materiál přímo z knihovny programu *ANSYS* označený jako *Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg*. Jeho charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 6. Identický materiál byl zvolen pro vidlici.

Tabulka 6: Charakteristiky materiálu *Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg*

| materiálová charakteristika | hodnota | jednotka |
|-----------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| hustota | 1490 | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Youngův modul (osa x) | $1,21 \cdot 10^{11}$ | Pa |
| Youngův modul (osa y) | $8,6 \cdot 10^9$ | Pa |
| Youngův modul (osa z) | $8,6 \cdot 10^9$ | Pa |
| Poissonův poměr (xy) | 0,27 | - |
| Poissonův poměr (yz) | 0,4 | - |
| Poissonův poměr (xz) | 0,27 | - |
| Modul pružnosti ve smyku (xy) | $4,7 \cdot 10^9$ | Pa |
| Modul pružnosti ve smyku (yz) | $3,1 \cdot 10^9$ | Pa |
| Modul pružnosti ve smyku (xz) | $4,7 \cdot 10^9$ | Pa |

Náhradě přední vidlice byl přiřazen materiál označený v knihovně programu *ANSYS* jako *Structural Steel*. Jeho charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Charakteristiky materiálu *Structural Steel*

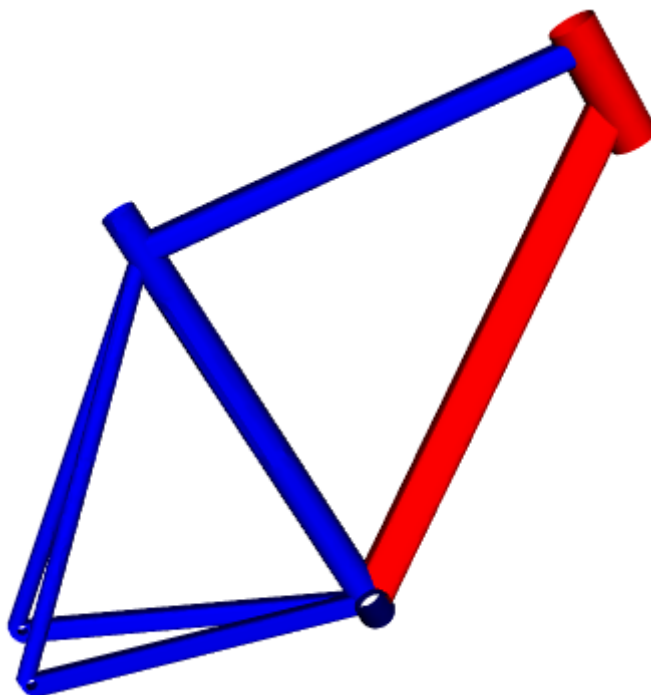
| materiálová charakteristika | hodnota | jednotka |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------------|
| hustota | 7850 | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Youngův modul | $2 \cdot 10^{11}$ | Pa |
| Poissonův poměr | 0,3 | - |

6.3 VRSTVENÍ KOMPOZITU

Pro vrstvení kompozitu byl využit v programu *ANSYS* přímo implementovaný modul pro kompozity s názvem *ACP (Pre)*.

V části modulu zvané *Model* je nutné nejprve přiřadit modelu, v případě této práce ploše, fiktivní tloušťku a fiktivní materiál, jinak by nebyl umožněn vstup do dalších částí modulu. Dále je v části *Model* vytvořena síť (opět pouze předběžná) a zejména jsou vytvořeny *Named Selections*, které jsou pro další práci klíčové, neboť na základě těchto výběru probíhá vlastní vrstvení kompozitu. U prvotního návrhu bylo vytvořeno třináct výběrů.

Hlavní částí modulu *ACP (Pre)* je část *Setup*. Nejprve byla v části *Material Data* v záložce *Fabrics* nadefinována tloušťka jednotlivé vrstvy. Ta byla zvolena 0,2 mm. Následně došlo na definování vrstev v záložce *Stackups*. Na základě poznatků získaných z [19, 20, 21] byly zvoleny dvě výchozí skladby. Na všech trubkách s výjimkou hlavové a dolní rámové byla použita skladba $[0, 90, -45, 45]_s$ – tedy byl použit kompozit o tloušťce 1,6 mm. Na hlavové a dolní rámové trubce byla použita zesílená skladba $[0, 0, 90, 90, -45, 45, -45, 45]_s$ – tedy se jednalo o kompozit o tloušťce 3,2 mm. Tloušťky kompozitu pro jednotlivé trubky rámu jsou znázorněny na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Grafické znázornění tloušťky kompozitu na rámu – modrá = 1,6 mm, červená = 3,2 mm

V části *Rosettes* byly definovány souřadnicové systémy. S ohledem na povahu trubek byl za nejvhodnější typ souřadnicového systému zvolen cylindrický tak, aby osa z byla vždy osou trubky. Je nutné definovat souřadnicový systém pro každou trubku zvlášť, neboť osa x tohoto systému určuje při vrstvení směr vláken 0° . U prvotního návrhu bylo na rámu vytvořeno deset souřadnicových systémů.

V části *Oriented Selection Sets* byly spojeny oblasti definované v dříve vytvořených *Named Selections* se směry, ve kterých se bude vrstvit („dovnitř“ nebo „ven“ ve směru normály plochy). Taktéž se v této části přiřadí konkrétním oblastem náležící souřadnicové systémy vytvořené v části *Rosettes*. U prvotního návrhu bylo vytvořeno jedenáct *Oriented Selection Sets*.

V části *Modeling Groups* probíhá samotné vrstvení. Bylo vytvořeno sedm skupin. Každá skupina spojuje vybraný *Oriented Selection Set* s náležícími vrstvami, které byly definovány v záložce *Stackups*. Dále je volen úhel vrstvení (vzhledem k nulovému směru definovanému osou x náležícího souřadnicového systému) a počet vrstev.

7 NUMERICKÉ SIMULACE TUHOSTNÍCH ZKOUŠEK NAVRŽENÉHO RÁMU

Protože protokoly z testování prováděného výše zmíněnou firmou EFBE Prüftechnik GmbH podléhají utajení, bylo třeba si na začátku stanovit hodnoty tuhosti, kolem kterých by se rám měl pohybovat. Jako vhodný se jeví následující postup – tvarově identický rám, avšak vyrobený ze slitiny hliníku, se podrobí oběma tuhostním zkouškám a obdržené výsledky budou představovat hledané hodnoty tuhosti.

Jakožto materiál kovového rámu byla zvolena slitina hliníku 7020-T6. Slitiny hliníku řady 7xxx obsahují jako hlavní legující prvek zinek [22]. Tepelná úprava T6 značí rozpouštěcí žíhání s následným umělým stárnutím. Materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Charakteristiky slitiny hliníku 7020-T6 [23]

| materiálová charakteristika | hodnota | jednotka |
|-----------------------------|-------------------|----------|
| Youngův modul | $7 \cdot 10^{10}$ | Pa |
| Poissonův poměr | 0,33 | - |

Tloušťka stěny rámu ze slitiny hliníku byla volena 1,4 mm, což odpovídá nejlehčím ráům ze slitin hliníku.

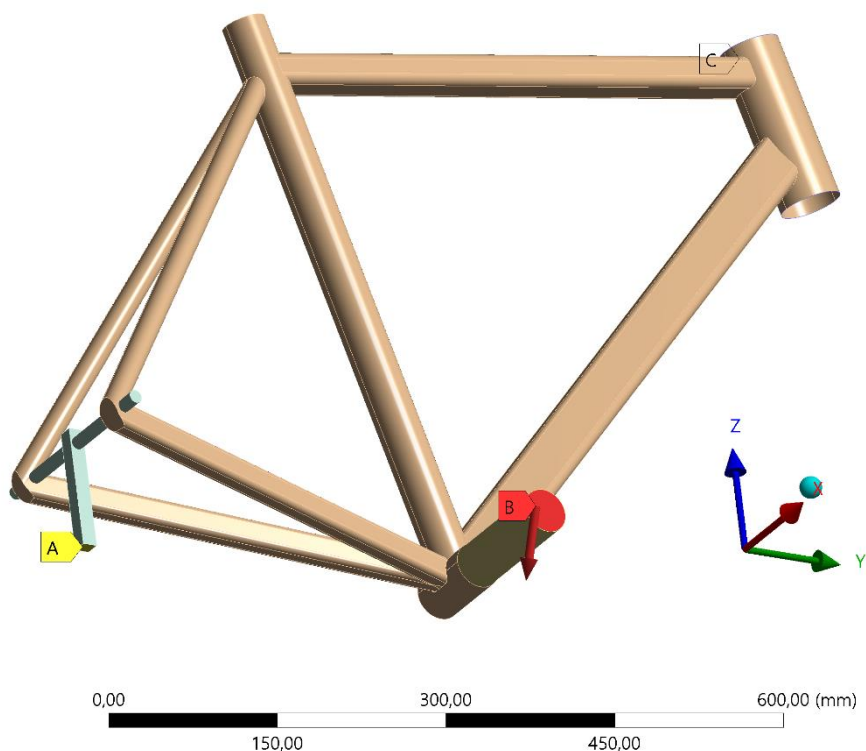
7.1 OUT OF SADDLE RIGIDITY

Na prvotní návrh rámu a tentýž rám ze slitiny hliníku byly aplikovány okrajové podmínky tak, jak je znázorněno na obrázku 7.1. V místech patek a středového složení byly namodelovány ocelové přípravky (materiál *Structural Steel* – charakteristiky viz tabulka 7) napodobující ty, které jsou využity při reálné zkoušce. Spodní ploše přípravku v patkách byl zamezen posuv ve všech osách (na obrázku 7.1 okrajová podmínka A). Horní hrana hlavové trubky byla vetknuta (na obrázku 7.1 okrajová podmínka C). Na přípravek umístěný v oblasti středového složení byla zavedena síla F_{OSR} o velikosti 100 N pod úhlem $\alpha_{OSR} = 26^\circ$ vzhledem k ose z (na obrázku 7.1 okrajová podmínka B). Tato síla byla rozložena do složky v ose x značené $F_{OSR;x}$ a do složky v ose z značené $F_{OSR;z}$:

$$\sin 26^\circ = \frac{F_{OSR;x}}{F_{OSR}} \Rightarrow F_{OSR;x} = \sin 26^\circ \cdot 100 \approx 43,847 \text{ N}$$

$$\cos 26^\circ = \frac{F_{OSR;z}}{F_{OSR}} \Rightarrow F_{OSR;z} = \cos 26^\circ \cdot 100 \approx 89,879 \text{ N}$$

Velikost síly F_{OSR} byla libovolně zvolena – její hodnota není důležitá, důležité je jen zachovat její stejnou velikost a směr pro zkoušku jak s rámem ze slitiny hliníku, tak z kompozitu.



Obrázek 7.1: Okrajové podmínky – zkouška *Out of saddle rigidity*

Co se týká sítě, byly použity prvky SHELL181, SOLID186 a SOLID187. Prvek SHELL181 použitý na rámu je svou povahou vhodný pro tenkostěnné konstrukce. Tento prvek má 4 uzly a v každém 6 stupňů volnosti [24]. Prvky SOLID186 a SOLID187 byly použity na ocelových přípravech. Prvek SOLID186 má 20 uzlů, přičemž každý má 3 stupně volnosti (posuv v osách x , y a z) [25]. Prvek SOLID187 má 10 uzlů, kde v každém jsou 3 stupně volnosti (posuv v osách x , y a z) [26].

Při zkoušce s rámem ze slitiny hliníku měla síť 37671 uzlů a 30111 prvků. Při zkoušce s rámem z kompozitu bylo uzlů 35693 a prvků 28929.

Dle popisu zkoušky je vyhodnocován posuv ve směru kolmém k zemi (zde tedy v ose z) v místě působení síly, ze kterého se následně vypočte tuhost. Hodnota průhybu v tomto místě (přibližně ve středu ocelové tyče) činí u rámu ze slitiny hliníku $u_{OSR;Al} = -1,133$ mm. Z toho dostáváme tuhost rámu ze slitiny hliníku k_{Al} :

$$k_{OSR;Al} = \frac{F_{OSR;z}}{u_{OSR;Al}} = \frac{89,879}{|-1,133|} \approx 79,328 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

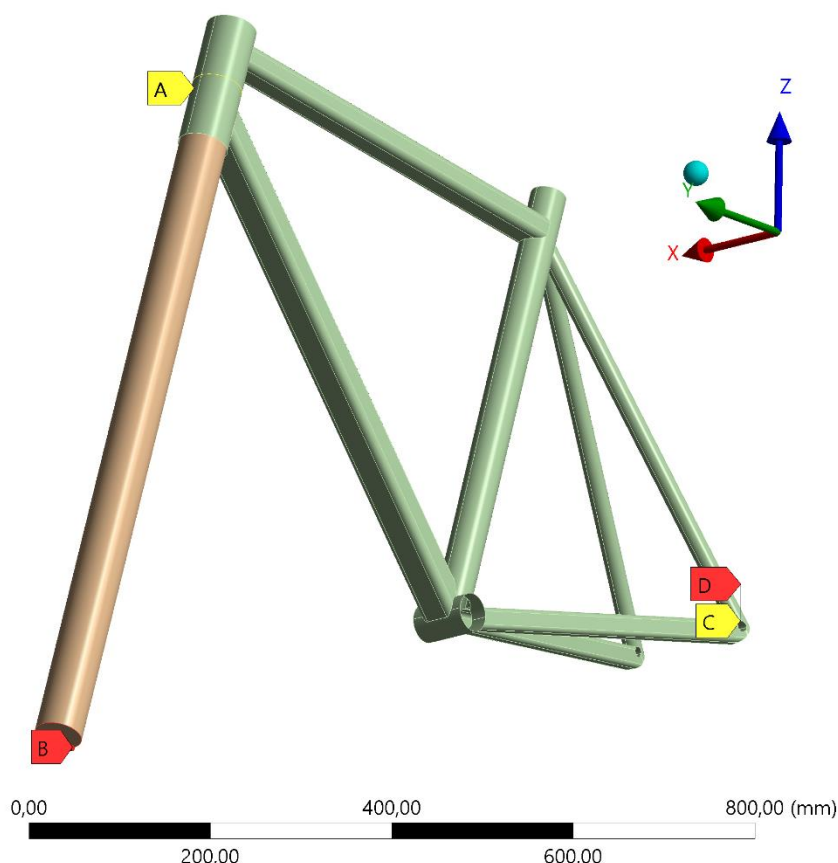
Hodnota průhybu ve vyhodnocovaném místě činí u rámu z kompozitu $u_{OSR;c} = -0,354$ mm. Z toho dostáváme tuhost rámu z kompozitu:

$$k_{OSR;k} = \frac{F_{OSR;z}}{u_{OSR;c}} = \frac{89,879}{|-0,354|} \approx 253,895 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Výsledek této zkoušky je tedy pro prvotní návrh rámu více než dostačující.

7.2 TRACK HOLDING RIGIDITY

Na prvotní návrh rámu a tentýž rám ze slitiny hliníku byly aplikovány okrajové podmínky tak, jak je znázorněno na obrázku 7.2. Do hlavové trubky byl zaveden ocelový přípravek (materiál *Structural Steel* – charakteristiky viz tabulka 7), na jehož konci působí síla F_{THR} o velikosti 100 N ve směru osy x (na obrázku 7.2 okrajová podmínka B). Hranám ve středu hlavové trubky byl zamezen posuv v ose x (na obrázku 7.2 okrajová podmínka A). Patkám byl zamezen posuv ve všech osách (na obrázku 7.2 okrajová podmínka C) a zamezena rotace kolem osy y a z (na obrázku 7.2 okrajová podmínka D).



Obrázek 7.2: Okrajové podmínky – zkouška Track Holding Rigidity

Co se týká sítě, byly použity prvky SHELL181 a SOLID186. Při zkoušce s rámem ze slitiny hliníku činil počet uzlů 30968 a počet prvků 22973. Při zkoušce s ráme z kompozitu byl počet uzlů 30714 a počet prvků 22996.

Dle popisu zkoušky je vyhodnocován posuv ve směru kolmém k zemi (zde tedy v ose x) v místě působení síly, ze kterého se následně vypočte tuhost. Hodnota průhybu v tomto místě (přibližně ve středu ocelové tyče) činí u rámu ze slitiny hliníku $u_{THR;Al} = 5,453$ mm. Z toho dostáváme tuhost rámu ze slitiny hliníku:

$$k_{THR;Al} = \frac{F_{THR}}{u_{THR;Al}} = \frac{100}{5,453} \approx 18,339 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Hodnota průhybu ve vyhodnocovaném místě činí u rámu z kompozitu $u_{THR;C} = 5,512$ mm. Z toho dostáváme tuhost rámu z kompozitu:

$$k_{THR;k} = \frac{F_{THR}}{u_{THR;C}} = \frac{100}{5,512} \approx 18,142 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Výsledek této zkoušky je tedy pro prvotní návrh rámu dostačující.

8 NUMERICKÉ SIMULACE PEVNOSTNÍCH ZKOUŠEK RÁZEM NAVRŽENÉHO RÁMU

Při pevnostním testování prvotního návrhu rámu byla využita u všech zkoušek sestava rámu s vidlicí. Na vidlici byla použita skladba $[0, 0, 90, 90, 0, 0, -45, 45, -45, 45, -45, 45]_s$ – tedy se jednalo o kompozit o tloušťce 5,6 mm.

Co se týká sítě, byla u obou zkoušek využita možnost volné sítě. Byl použit prvek SHELL181. Počet uzlů činil 33026, počet prvků 33258.

8.1 ZKOUŠKA RÁZEM – PADAJÍCÍ ZÁVAŽÍ

Pro simulaci zkoušky rázem s padajícím závažím bylo nejprve nutné vypočítat sílu, kterou závaží působí v okamžiku nárazu na rám. Při tomto výpočtu se vycházelo ze zákona zachování energie ve tvaru:

$$E_{p;zavazi} = A_{pz}$$

$$m_{zavazi} \cdot g \cdot h_1 = \frac{1}{2} \cdot k_y \cdot u_y$$

kde:

$E_{p;zavazi}$ [J] – potenciální energie závaží v poloze před uvolněním

A_{pz} [J] – práce vykonaná vnější silou

m_{zavazi} [kg] – hmotnost závaží

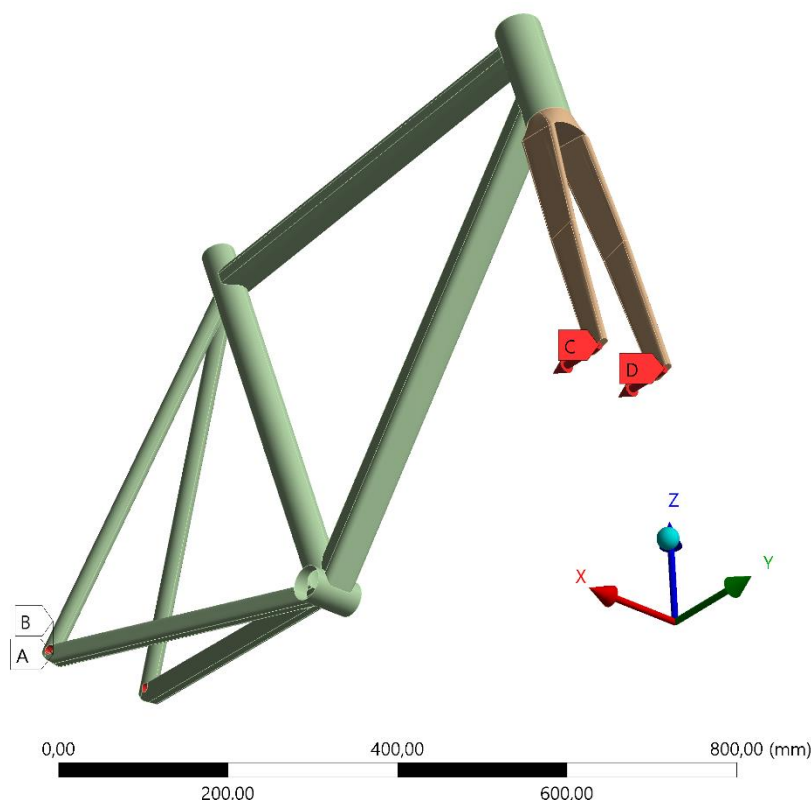
g $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ – tíhové zrychlení

h_1 [m] – výška závaží před uvolněním

k_y $\left[\frac{N}{m}\right]$ – tuhost (vidlice) v místě působení síly

u_y [m] – posuv vyvolaný působící silou

Nejdříve bylo třeba vypočítat tuhost k_y . Pro tyto účely byla na patky vidlice zavedena síla 100 N (tzn. na každou patku vidlice síla $F_{test;1} = 50$ N – viz okrajové podmínky C a D na obrázku 8.1. Po zavedení této síly byla provedena statická strukturní analýza, na základě které byl zjištěn posuv u_y . Při této analýze byly okrajové podmínky, s výjimkou velikosti působící síly použity ty stejné jako při následné zkoušce samotné. Patkám rámu bylo zabráněno posuvu ve všech směrech a zároveň jim byla zamezena rotace ve všech směrech (tj. patky byly vetknuty) – na obrázku 8.1 se jedná o vazby A a B.



Obrázek 8.1: Okrajové podmínky – zkouška rázem s padajícím závažím

Analýzou byla obdržena hodnota posuvu $u_y = -1,467$ mm. Na základě této hodnoty bylo možné vypočítat tuhost k_y podle vztahu:

$$k_y = \frac{F_{test;1}}{u_y} = \frac{50}{1,467 \cdot 10^{-3}} \approx 34083,163 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Tuhost k_y bude v případě samotné zkoušky stejná jako při výše uvedeném výpočtu. Sílu, kterou závaží působí na rám v okamžiku nárazu tedy získáme následujícím postupem:

$$\begin{aligned} E_p &= A_{pz} = m_{zavazi} \cdot g \cdot h_1 = 22,5 \cdot 9,81 \cdot 0,212 \approx 46,794 \text{ J} \\ A_{pz} &= \frac{1}{2} \cdot k_y \cdot u_y = \frac{1}{2} \cdot k_y \cdot \frac{F_{pz}^2}{k_y^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_{pz}^2}{k_y} \Rightarrow F_{pz} = \sqrt{2 \cdot A_{pz} \cdot k_y} \\ &= \sqrt{2 \cdot 46,794 \cdot 34083,163} \approx 1785,994 \text{ N} \end{aligned}$$

Pro samotnou zkoušku s padajícím závažím tedy okrajové podmínky C a D (viz obrázek 8.1) mají hodnotu poloviční oproti síle F_{pz} , tj. do každé patky je zadána síla o velikosti $892,997 \text{ N} \approx 893 \text{ N}$.

Aby rám prošel zkouškou, musí splnit podmínky viz podkapitola 5.1. Podmínka pro maximální deformaci vidlice je splněna – je dosaženo hodnoty $26,192 \text{ mm}$, povoleny jsou hodnoty do 30 mm . Dále je předepsáno, že na rámu nesmějí být žádné viditelné trhliny – tedy nesmí dojít k porušení první vrstvy. K posouzení bude využito statické pevnostní kritérium Tsai-Wu.

Jestliže dostaneme napětí a deformace v jednotlivých vrstvách, můžeme vyčíslit hodnotu kritéria f , kterou pak lze porovnat s kritickou hodnotou 1 [1]. Hodnota 1 značí pro vyhodnocovaný rám mezní stav porušení první vrstvy. Pro určení hodnoty kritéria potřebujeme znát meze pevnosti v tlaku UCS a meze pevnosti v tahu UTS . Hodnoty UCS a UTS pro použitý materiál byly zjištěny v programu *ANSYS* v knihovně materiálů v části *Engineering Data*. Protože se jedná o kompozit, je nutné uvažovat tyto hodnoty pro jednotlivé směry laminátu zvlášť. Tyto materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9: Hodnoty mezí pevnosti pro použitý materiál

| směr | UTS [MPa] | UCS [MPa] |
|----------------|-------------|-------------|
| longitudinální | 2231 | −1082 |
| transversální | 29 | −100 |
| ortogonální | 29 | −100 |

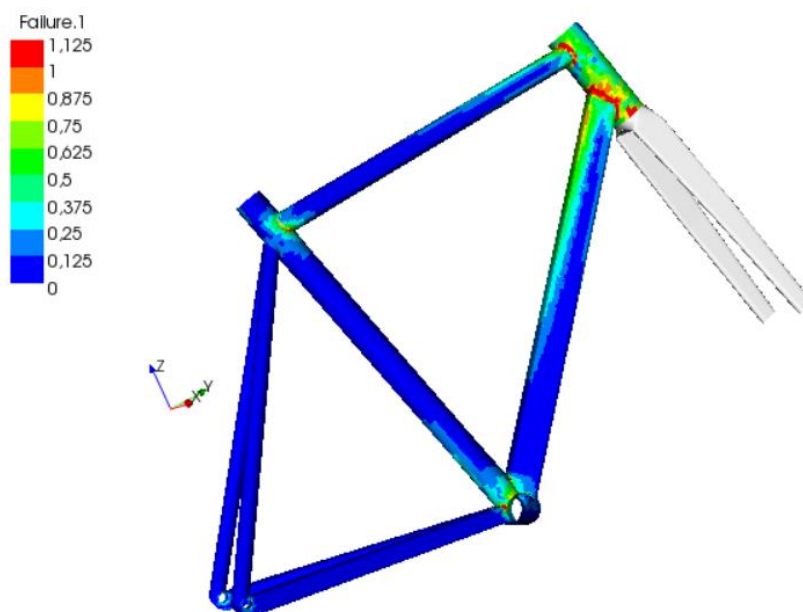
Byla využita varianta Tsai-Wu kritéria pro prostorové úlohy v následujícím tvaru [27]:

$$\begin{aligned}
 f = & \frac{\sigma_l^2}{UTS_l \cdot UCS_l} + \frac{\sigma_t^2}{UTS_t \cdot UCS_t} + \frac{\sigma_o^2}{UTS_o \cdot UCS_o} + \frac{\tau_{lt}^2}{USS_{lt}^2} + \frac{\tau_{lo}^2}{USS_{lo}^2} + \frac{\tau_{to}^2}{USS_{to}^2} \\
 & - \frac{\sigma_l \cdot \sigma_t}{\sqrt{UTS_l \cdot UCS_l \cdot UTS_t \cdot UCS_t}} - \frac{\sigma_l \cdot \sigma_o}{\sqrt{UTS_l \cdot UCS_l \cdot UTS_o \cdot UCS_o}} \\
 & - \frac{\sigma_t \cdot \sigma_o}{\sqrt{UTS_t \cdot UCS_t \cdot UTS_o \cdot UCS_o}} + \sigma_l \cdot \left(\frac{1}{UTS_l} - \frac{1}{UCS_l} \right) + \sigma_t \cdot \left(\frac{1}{UTS_t} - \frac{1}{UCS_t} \right) \\
 & + \sigma_o \cdot \left(\frac{1}{UTS_o} - \frac{1}{UCS_o} \right)
 \end{aligned}$$

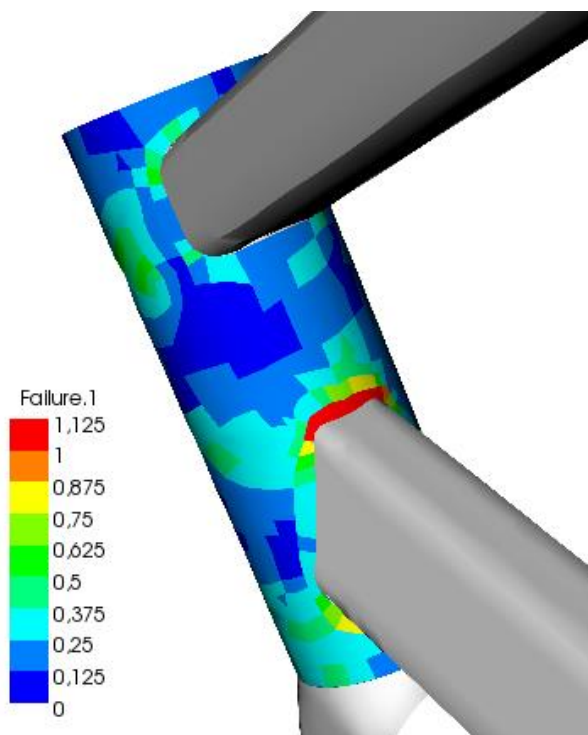
kde:

- σ_l [MPa] – napětí v longitudinálním směru
- σ_t [MPa] – napětí v transversálním směru
- σ_o [MPa] – napětí v ortogonálním směru
- τ_{lt} [MPa] – smykové napětí v rovině $l - t$
- τ_{lo} [MPa] – smykové napětí v rovině $l - o$
- τ_{to} [MPa] – smykové napětí v rovině $t - o$
- UTS_l [MPa] – mez pevnosti v tahu v longitudinálním směru
- UTS_t [MPa] – mez pevnosti v tahu v transversálním směru
- UTS_o [MPa] – mez pevnosti v tahu v ortogonálním směru
- UCS_l [MPa] – mez pevnosti v tlaku v transversálním směru
- UCS_t [MPa] – mez pevnosti v tlaku v transversálním směru
- UCS_o [MPa] – mez pevnosti v tlaku v ortogonálním směru
- USS_{lt} [MPa] – mez pevnosti ve smyku v rovině $l - t$
- USS_{lo} [MPa] – mez pevnosti ve smyku v rovině $l - o$
- USS_{to} [MPa] – mez pevnosti ve smyku v rovině $t - o$

Výsledky hodnocení podle kritéria Tsai-Wu jsou znázorněny na obrázku 8.2. Na rámu dochází k překročení kritické hodnoty 1 zejména v místech napojení horní a dolní trubky na trubku hlavovou. Na jednotkách prvků lze pozorovat překročení kritické hodnoty také v oblasti středového složení a v místě napojení horní trubky na trubku sedlovou. Je třeba si však uvědomit, že v normě se hovoří o *viditelných trhlinách*, tedy v případě kompozitního rámu se jedná o trhlinu v první vrstvě (tj. na povrchu). Při kontrole první vrstvy v exponované oblasti hlavové trubky se ukázalo, že i v první vrstvě je kritická hodnota překročena a je tedy žádoucí toto místo zesílit. Vyhodnocení kritéria v první vrstvě na hlavové trubce je znázorněno na obrázku 8.3 – je třeba však brát v potaz, že realita se může od výsledku lišit, neboť se jedná o oblast spoje.



Obrázek 8.2: Vyhodnocení míry poruchy dle kritéria Tsai-Wu u zkoušky rázem s padajícím závažím (prvotní návrh rámu)



Obrázek 8.3: Vyhodnocení míry poruchy v první vrstvě dle kritéria Tsai-Wu u zkoušky rázem s padajícím závažím (prvotní návrh rámu)

8.2 ZKOUŠKA RÁZEM – PADAJÍCÍ RÁM

Pro simulaci zkoušky rázem s padajícím rámem bylo nejprve nutné vypočítat sílu, kterou bude rám zatížen v místě svého těžiště. Při výpočtu bylo vycházeno ze zákona zachování energie:

$$E_{k;1} + E_{p;1} = E_{k;2} + E_{p;2} = A_{pr}$$

$$0 + m_{celek} \cdot g \cdot h_2 = \frac{1}{2} \cdot I_o \cdot \omega^2 + 0 = A_{pr}$$

kde:

$E_{k;1}$ [J] – kinetická energie rámu se závažími ve výchozím stavu (před upuštěním)

$E_{p;1}$ [J] – potenciální energie rámu se závažími ve výchozím stavu (před upuštěním)

$E_{k;2}$ [J] – kinetická energie rámu se závažími v konečném stavu (po upuštění)

$E_{p;2}$ [J] – potenciální energie rámu se závažími v konečném stavu (po upuštění)

A_{pr} [J] – práce vnějších sil

m_{celek} [kg] – hmotnost rámu s vidlicí a se závažími

I_o [kg · m²] – moment setrvačnosti vzhledem k ose otáčení (osa prochází patkami rámu)

ω [rad · s⁻¹] – úhlová rychlost rámu se závažími

Nejprve bylo nutné vypočítat tuhost rámu. Vzhledem k tomu, že síla působí v těžišti a to se nachází mimo rám (tedy v tomto místě nelze určit posuv), bylo jako místo pro určení tuhosti vybráno místo, kde nahoře končí sedlová trubka. Tuhost byla vypočtena na základě vztahu:

$$k_z = \frac{F_{test;2}}{u_z}$$

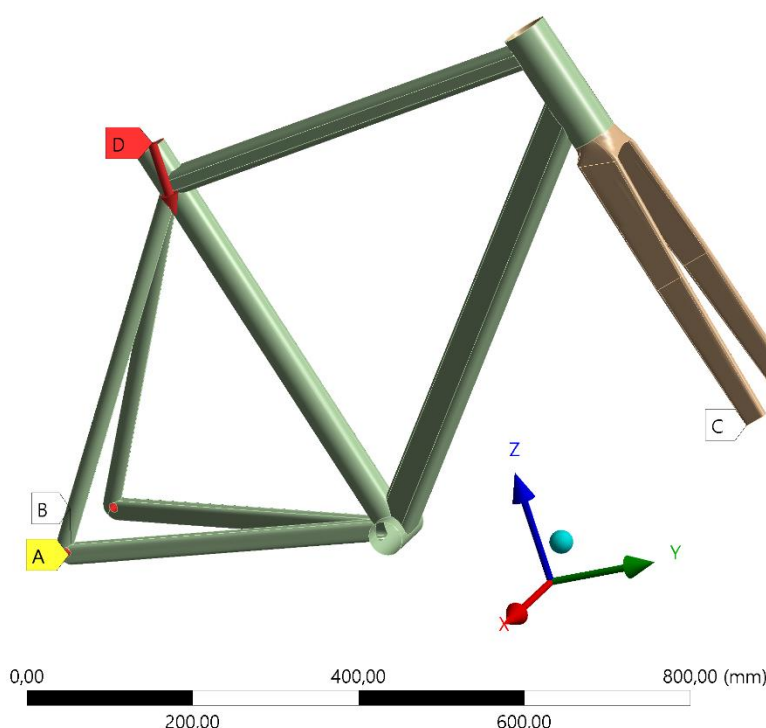
kde:

$k_z \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$ – tuhost na konci sedlové trubky

$F_{test;2}$ [N] – libovolně volená síla pro určení tuhosti

u_z [m] – posuv v místě působení zvolené síly

Okrajové podmínky byly při výpočtu tuhosti, resp. výpočtu posuvu, voleny až na působící sílu a absenci závaží stejné, jako při samotné zkoušce rázem s padajícím rámem. Patkám rámu bylo zamezeno posuvu ve všech směrech a zároveň bylo zamezeno rotaci kolem os y a z (na obrázku 8.4 okrajové podmínky A a B). Patkám vidlice bylo zamezeno posuvu v ose z (na obrázku 8.4 okrajová podmínka C). Síla $F_{test;2}$ působí na horní hranu sedlové trubky (na obrázku 8.4 okrajová podmínka D).



Obrázek 8.4: Okrajové podmínky – zkouška rázem s padajícím rámem (určení tuhosti)

Analýzou byla obdržena hodnota hledaného posuvu $u_z = 0,191$ mm. Pro tuhost k_z tedy platí:

$$k_z = \frac{F_{test;2}}{u_z} = \frac{1000}{0,191 \cdot 10^{-3}} \approx 5235602,094 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Následně je třeba určit hmotnost m_{celek} . Jak je uvedeno výše, jedná se o součet hmotností rámu, vidlice a závaží. Závaží má celkovou hmotnost 90 kg. Hmotnost rámu s vidlicí byla zjištěna v *Solution Information* a činí 1,979 kg. Celková hmotnost tedy je $m_{celek} = 91,979$ kg.

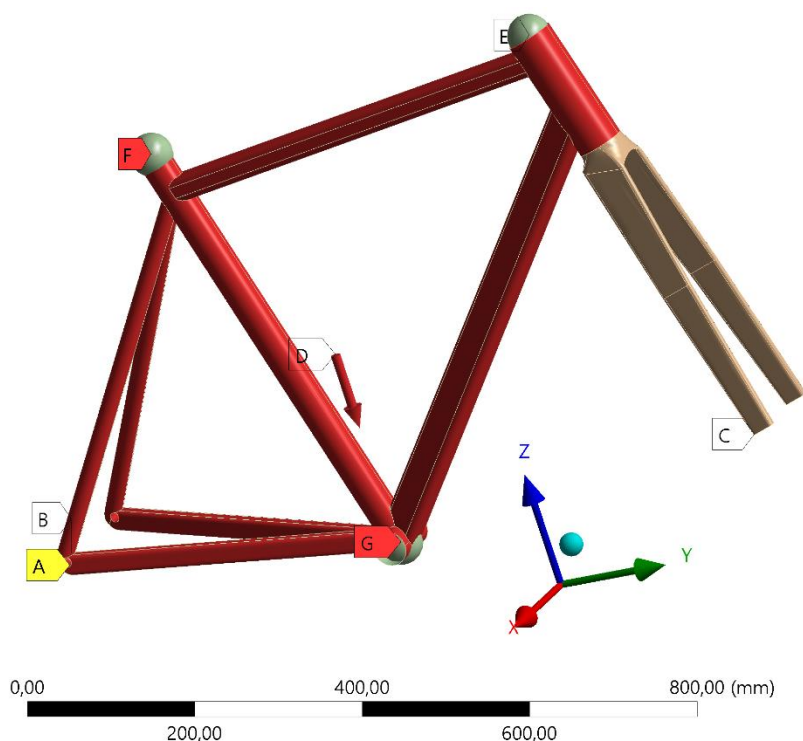
Nyní je již možné určit sílu, kterou bude rám zatížen v těžišti při samotné zkoušce:

$$A_{pr} = m_{celek} \cdot g \cdot h_2 = 91,979 \cdot 9,81 \cdot 0,2 = 180,463 \text{ J}$$

$$A_{pr} = \frac{1}{2} \cdot k_z \cdot u_z = \frac{1}{2} \cdot k_z \cdot \frac{F_{pr}^2}{k_z^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_{pr}^2}{k_z} \Rightarrow F_{pr} = \sqrt{2 \cdot A_{pr} \cdot k_z}$$

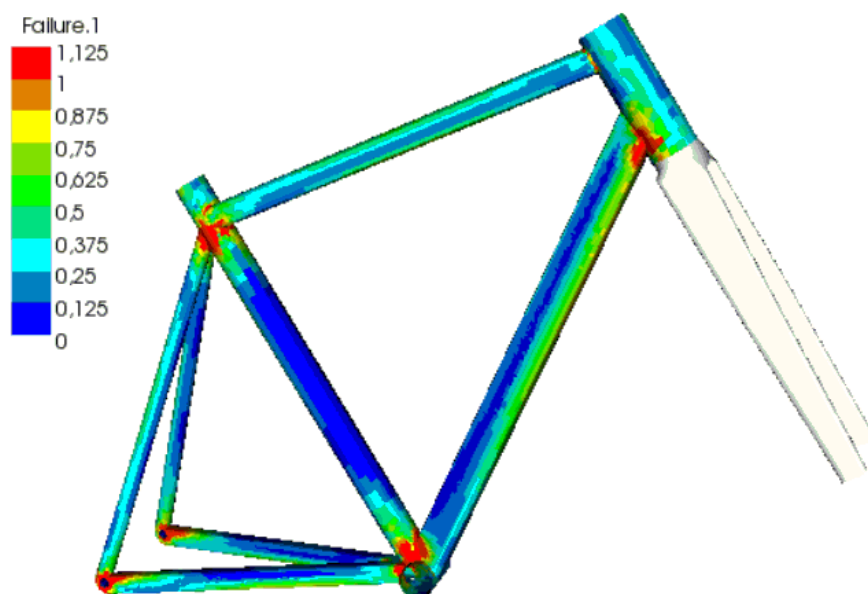
$$= \sqrt{2 \cdot 180,463 \cdot 5235602,094} \approx 43470,276 \text{ N}$$

Pro samotnou zkoušku rázem s padajícím závažím byly okrajové podmínky rozšířeny o závaží, kterým je rám s vidlicí zatížen. Toto bylo realizováno pomocí *Point Mass*. Na horní hranu hlavové trubky je umístěno závaží $M_2 = 10 \text{ kg}$ (na obrázku 8.5 okrajová podmínka E), na horní hranu sedlové trubky je umístěno závaží $M_1 = 30 \text{ kg}$ (na obrázku 8.5 okrajová podmínka F) a v oblasti středového složení je závaží $M_3 = 50 \text{ kg}$ (na obrázku 8.5 okrajová podmínka G). Okrajové podmínky A, B a C jsou identické jako v předchozím případě. Okrajovou podmínku D na obrázku 8.5 představuje síla F_{pr} . Jedná se o *Remote Force* umístěnou do těžiště (souřadnice těžiště rámu s vidlicí a se závažím byly zjištěny obdobně jako celková hmotnost v *Solution Information*).



Obrázek 8.5: Okrajové podmínky – zkouška rázem s padajícím rámem

Aby rám prošel zkouškou, musí splnit podmínky viz podkapitola 5.2. Podmínka pro maximální deformaci rozvoru není splněna – je dosaženo hodnoty 23,268 mm, povoleny jsou hodnoty do 15 mm. Dále je předepsáno, že na rámu nesmějí být žádné viditelné trhliny. K posouzení bylo vybráno opět pevnostní kritérium Tsai-Wu. Vyhodnocení míry poruchy dle zvoleného kritéria je znázorněno na obrázku 8.6. K překročení kritické hodnoty dochází v oblasti spoje hlavové trubky s dolní rámovou trubicí, dále v oblasti napojení sedlových vzpěr a horní rámové trubky na trubku sedlovou, v oblasti patek rámu a také v oblasti středového složení. Kritická hodnota je překročena na mnoha místech i v první vrstvě, resp. prvních vrstvách. Prvotní návrh rámu tedy není, co se této zkoušky týká, akceptovatelný.



Obrázek 8.6: Vyhodnocení míry poruchy dle kritéria Tsai-Wu u zkoušky rázem s padajícím rámem (prvotní návrh rámu)

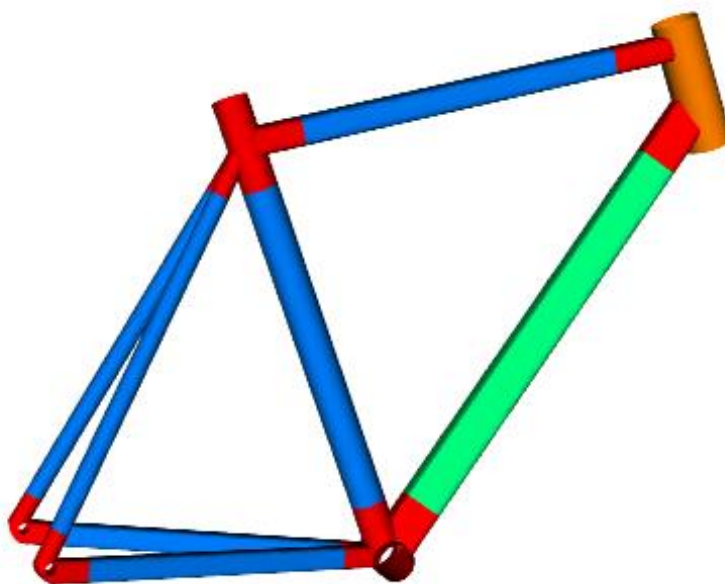
9 NÁVRH ZPEVNĚNÉHO RÁMU SILNIČNÍHO KOLA

Při pevnostních zkouškách rázem se ukázalo, že rám je nutné v některých místech vyztužit. Jedná se o místa, kde se na sebe napojují jednotlivé trubky. Aby mohla být v *ACP (Pre)* nadefinována v exponovaných místech větší tloušťka kompozitu, bylo nejprve nutné vrátit se do programu *Catia* a vytvořit plochy, které se budou vyztužovat, aby se těchto ploch následně mohly formovat *Named Selections*.

V *ACP (Pre)* byly v části *Setup* v záložce *Stackups* nadefinovány dvě nové skladby kompozitu, které byly použity v exponovaných místech. V tabulce 10 je popsáno, jak byl kompozit rozložen. Tloušťka kompozitu je znázorněna na obrázku 9.1.

Tabulka 10: Rozložení kompozitu na vyztuženém rámu (druhotní návrh)

| oblast použití | skladba | tloušťka [mm] | barva na obrázku 9.1 |
|---|--|------------------|----------------------------|
| horní trubka, sedlová trubka, řetězové vzpěry, sedlové vzpěry | $[0, 90, -45, 45]_s$ | 1,6 | modrá |
| dolní trubka | $[0, 0, 90, 90, -45, 45, -45, 45]_s$ | 3,2 | zelená |
| vidlice | $[0, 0, 90, 90, 0, 0, -45, 45, -45, 45, -45, 45, -45, 45]_s$ | 5,6 | - |
| hlavová trubka | $[0, -45, 45, 90]_{4s}$ | 6,4 | oranžová |
| spoje trubek | $[0, -45, 45, 90]_{5s}$ | 8 | červená |



Obrázek 9.1: Grafické znázornění tloušťky kompozitu na rámu – modrá = 1,6 mm, zelená = 3,2 mm, oranžová = 6,4 mm, červená = 8 mm

Další postup byl obdobný jako u prvotního návrhu s tím rozdílem, že díky rozdělení trubek na více částí bylo nutné vytvořit devatenáct *Oriented Selection Sets* a že v části *Modeling Groups* bylo vytvořeno šest skupin.

10 NUMERICKÉ SIMULACE PEVNOSTNÍCH ZKOUŠEK RÁZEM ZPEVNĚNÉHO RÁMU

U zkoušky rázem s padajícím závažím bylo s ohledem na vyšší náročnost výpočtu využito možnosti, kterou norma nabízí, a to sice, že vidlici je možno nahradit vidlicí fiktivní.

Co se týká sítě, byla opět u obou zkoušek využita možnost volné sítě, která se jevila jako dostačující. Sít' byla stejně jako u prvotního návrhu tvořena prvky SHELL181, avšak přibyly zde také prvky SOLID186, které byly použity na fiktivní vidlici.

U zkoušky rázem s padajícím rámem byl počet uzlů 34187 a počet prvků 34216. U zkoušky rázem s padajícím závažím činil počet uzlů 29603 a počet prvků 23489 – tato sít' je zobrazena na obrázku 10.1.



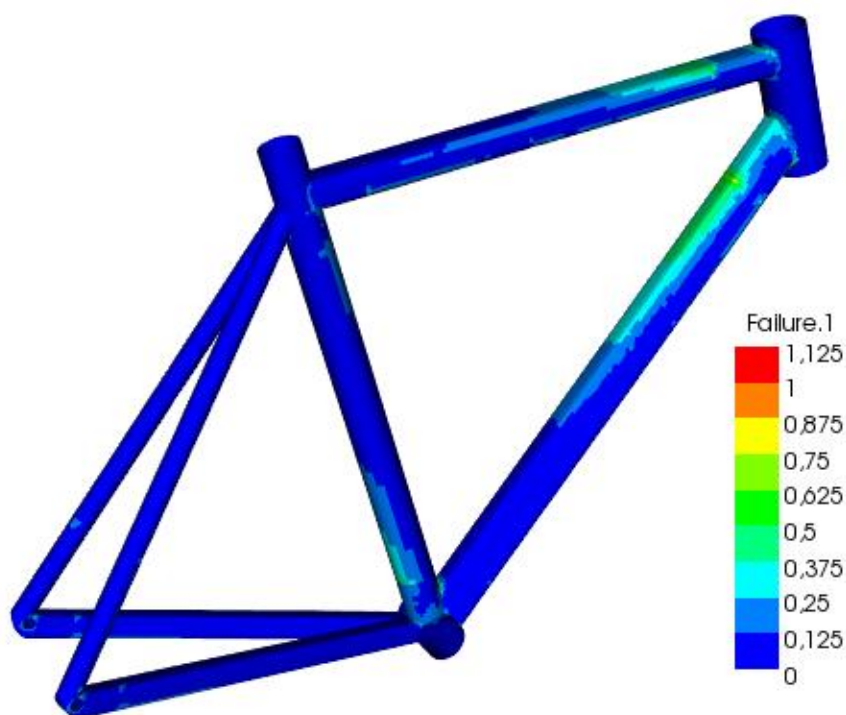
Obrázek 10.1: Použitá sít'

Okrajové podmínky byly použity pro obě zkoušky stejně jako v kapitole 8, proto budou uvedeny již jen výsledky.

10.1 ZKOUŠKA RÁZEM – PADAJÍCÍ ZÁVAŽÍ

Při této zkoušce se zesíleným rámem bude použita stejná zatěžující síla jako v podkapitole 8.1 – nárůst tuhosti rámu tedy bude zanedbán. Jediným rozdílem oproti zkoušce s prvotním návrhem rámu je to, že síla již nebude podělena dvěma a zadána na každou nohu vidlice, nýbrž bude zadána celá na spodní plochu náhrady vidlice.

Vyhodnocení míry poruchy podle kritéria Tsai-Wu je na obrázku 10.2. Z obrázku je patrné, že na rámu v žádné vrstvě v žádném místě není dosaženo kritické hodnoty. Maximální hodnota je $\approx 0,8$. Taktéž podmínka pro maximální deformaci vidlice je splněna – je dosaženo hodnoty 7,56 mm, povoleny jsou (pro zkoušku s fiktivní vidlicí) hodnoty do 15 mm.

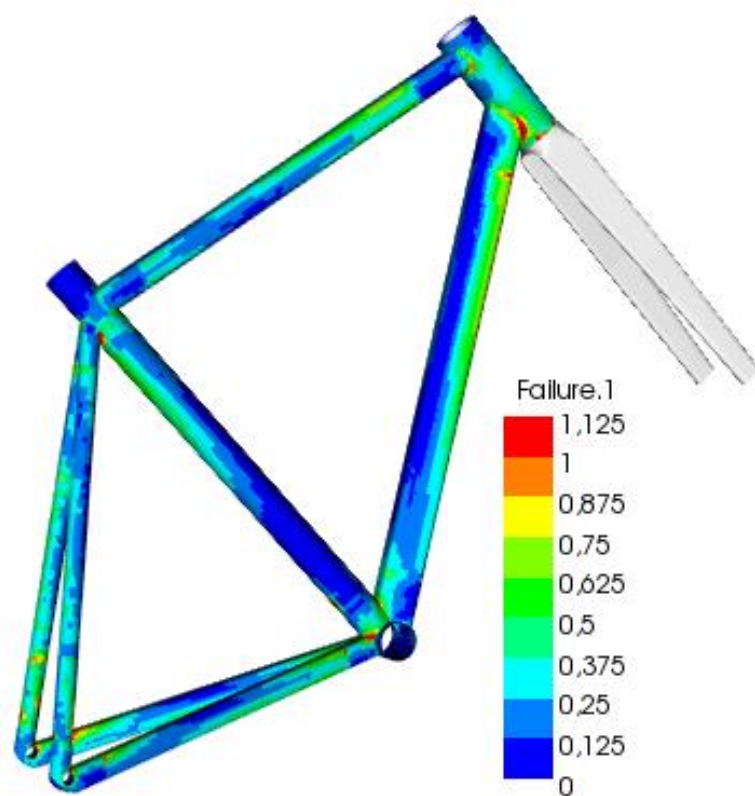


Obrázek 10.2: Vyhodnocení míry poruchy dle kritéria Tsai-Wu u zkoušky rázem s padajícím závažím (druhotní návrh rámu)

10.2 ZKOUŠKA RÁZEM – PADAJÍCÍ RÁM

Při této zkoušce se zesíleným rámem budou použity stejné zátěžné síly jako v podkapitole 8.2 – nárůst hmotnosti rámu a s ním spojená nepatrná změna těžiště budou zanedbány. U této zkoušky není možno, jak již bylo uvedeno výše, použít vidlici fiktivní, proto je simulace provedena s vidlicí skutečnou.

Podmínka pro maximální deformaci rozvoru je splněna – je dosaženo hodnoty 12,18 mm, povoleny jsou hodnoty do 15 mm. Vyhodnocení míry poruchy podle kritéria Tsai-Wu je na obrázku 10.3. Došlo k překročení kritické hodnoty, nicméně, jak je uvedeno v podkapitole 8.1, klíčové pro zvládnutí zkoušky je poškození v první vrstvě, ve které dochází k překročení hodnoty pouze na jednotkách prvků a rám je tedy možno považovat za vyhovující.



Obrázek 10.3: Vyhodnocení míry poruchy dle kritéria Tsai-Wu u zkoušky rázem s padajícím rámem (druhotní návrh rámu)

11 DIAGRAM TRVALÉ ÚNAVOVÉ PEVNOSTI PODLE HARRISE

Na základě poznatků z [27, 28] bylo zjištěno, že bez provedení zkoušek materiálových vlastností konkrétního použitého kompozitu, co se únavy týká, je možné použít jen velmi omezené množství způsobů, jak únavu vyhodnotit. Pro vyhodnocení byl vybrán diagram životnosti podle Harrise.

Harris se svými kolegy odvodil na základě velkého množství dat z provedených zkoušek semi-empirický vztah pro únavu vláknových kompozitů s uhlíkovými, resp. skelnými, vlákny [28]. Tento vztah má tvar:

$$a = f \cdot (1 - m)^u \cdot (c + m)^v$$

kde:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sigma_a}{UTS} \\ m &= \frac{\sigma_m}{UTS} \\ c &= \frac{UCS}{UTS} \\ f &= A \cdot c^{-p} \end{aligned}$$

kde:

a [–] – normovaná amplituda napětí
 f [–] – parametr únavového života
 u [–] – exponent únavového života
 v [–] – exponent únavového života
 m [–] – normované střední napětí
 c [–] – normovaná mez pevnosti v tlaku
 σ_a [MPa] – amplituda napětí
 σ_m [MPa] – střední napětí
 UTS [MPa] – mez pevnosti v tahu
 UCS [MPa] – mez pevnosti v tlaku
 A [–] – parametr únavového života
 p [–] – exponent únavového života

Odhad parametrů je založen na únavovém chování materiálu při různých typech zátěžných cyklů (tah – tlak, tah – tah, tlak – tlak). Studie [28] ukázaly, že parametr f má vliv na výšku křivky a že je funkcí poměru mezi mezí pevnosti v tlaku a mezí pevnosti v tahu. Parametry u a v mají vliv na tvar křivky. Parametry A a p jsou funkcí počtu cyklů. Pro jednosměrné kompozity takové, jaké jsou použity v této práci, je možné použít zjednodušení, kde $u = 1$, $v = 1$, $A = 0,71$ a $p = 1,05$ dle [28].

Aby bylo možné vyhodnotit rám z hlediska trvalé únavové pevnosti podle Harrise, bylo nejprve nutné zjistit maximální amplitudu napětí, kterou materiál při zatížení během zkoušek vydrží. Při zkoušce silami při šlapání a svislou silou je rám zatížen míjivým cyklem, tedy platí, že $\sigma_m =$

σ_a . Maximální amplituda napětí pro zkoušky silami při šlapání a svislou silou $\sigma_{a;max}$ byla s využitím výše uvedených zjednodušení odvozena následovně:

$$\begin{aligned}
 a &= f \cdot (1 - m)^u \cdot (c + m)^v \\
 \frac{\sigma_{a;max}}{UTS} &= A \cdot \frac{UCS^{-p}}{UTS} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{a;max}}{UTS}\right) \cdot \left(\frac{UCS}{UTS} + \frac{\sigma_{a;max}}{UTS}\right) \\
 \frac{\sigma_{a;max}}{UTS} &= A \cdot \frac{UCS^{-p}}{UTS} \cdot \left(\frac{UCS}{UTS} + \frac{\sigma_{a;max}}{UTS} - \frac{\sigma_{a;max} \cdot UCS}{UTS^2} - \frac{\sigma_{a;max}^2}{UTS^2}\right) \\
 & \quad (...) \\
 \frac{\sigma_{a;max}^2}{UTS^2} + \sigma_{a;max} \cdot \left(\frac{UCS}{UTS^2} - \frac{1}{UTS} + \frac{\left(\frac{UCS}{UTS}\right)^p}{A \cdot UTS}\right) - \frac{UCS}{UTS} &= 0
 \end{aligned}$$

Řešením této kvadratické rovnice dostáváme pro kladné $\sigma_{a;max}$:

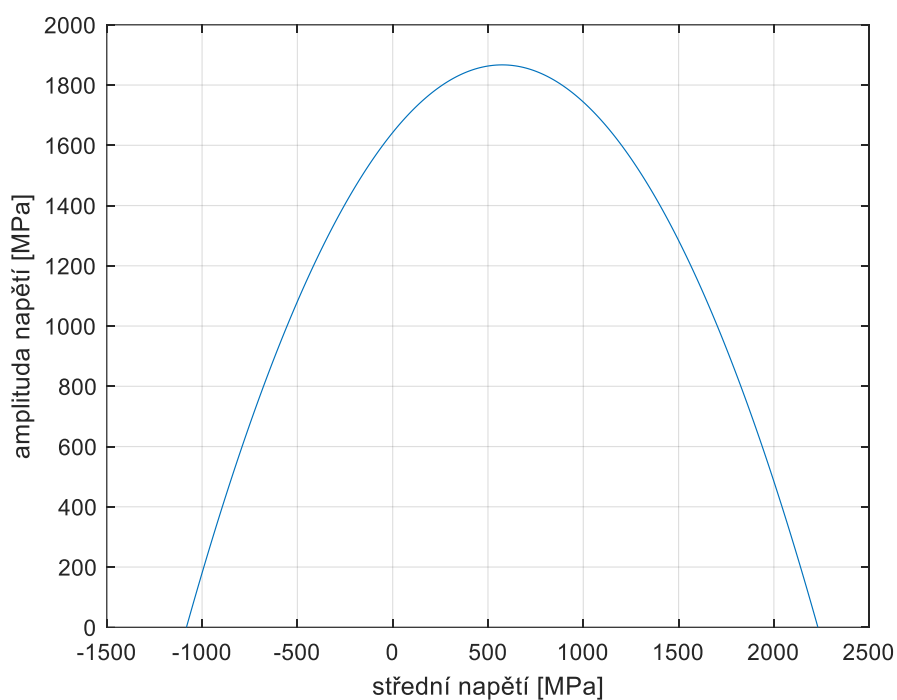
$$\sigma_{a;max} = \frac{UTS}{2} \cdot \left(1 - A^{-1} \cdot \left(\frac{UCS}{UTS}\right)^p - \frac{UCS}{UTS} + \sqrt{\left(\frac{UCS}{UTS} - 1 + A^{-1} \cdot \left(\frac{UCS}{UTS}\right)^p\right)^2 + 4 \cdot \frac{UCS}{UTS}}\right)$$

Při zkoušce vodorovnými silami je rám zatížen střídavým souměrným cyklem, tedy platí, že $\sigma_m = 0$. Maximální amplituda napětí pro zkoušku vodorovnými silami $\sigma_{a;max;2}$ byla s využitím výše uvedených zjednodušení odvozena následovně:

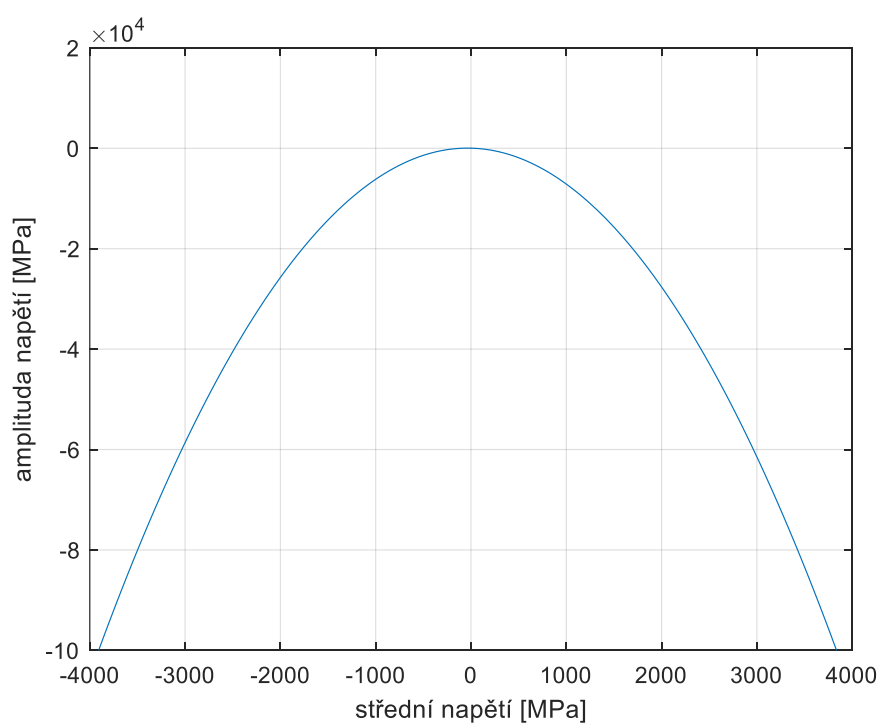
$$\begin{aligned}
 a &= f \cdot (1 - m)^u \cdot (c + m)^v \\
 \frac{\sigma_{a;max;2}}{UTS} &= A \cdot \frac{UCS^{-p}}{UTS} \cdot \frac{UCS}{UTS} \\
 \sigma_{a;max;2} &= A \cdot \frac{UCS^{-p}}{UTS} \cdot UCS
 \end{aligned}$$

Hodnoty UCS a UTS pro použitý materiál byly již uvedeny v tabulce 9.

Diagram trvalé únavové pevnosti podle Harrise pro zvolený materiál je na obrázku 11.1 (longitudinální směr), resp. 11.2 (transversální a ortogonální směr).



Obrázek 11.1: Diagram trvalé únavové pevnosti podle Harrise – longitudinální směr



Obrázek 11.2: Diagram trvalé únavové pevnosti podle Harrise – transversální, resp. ortogonální, směr

Po dosazení hodnot pro jednotlivé směry kopmozitu (*UCS* se dosazuje v absolutní hodnotě) do odvozených rovnic získáváme maximální hodnoty amplitudy napětí v jednotlivých směrech

(index l značí longitudinální směr, index t transversální směr, index o ortogonální směr) uvedené v tabulce 11.

Tabulka 11: Maximální hodnoty amplitudy napětí v jednotlivých směrech

| zkouška | zátěžný cyklus | $\sigma_{a;max;l}$ [MPa] | $\sigma_{a;max;t}$ [MPa] | $\sigma_{a;max;o}$ [MPa] |
|--------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| silami při šlapání | míjivý | 1402 | 12 | 12 |
| vodorovnými silami | střídavý souměrný | 1642 | 19 | 19 |
| svislou silou | míjivý | 1402 | 12 | 12 |

Pro vyhodnocení bylo dále nutné zjistit amplitudu napětí při dané zkoušce. Pro míjivý cyklus, a tedy pro zkoušky silami při šlapání a svislou silou platí za předpokladu, že druhé a třetí hlavní napětí jsou přibližně rovny nule:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_1}{2}$$

kde:

σ_1 [MPa] – první hlavní napětí

Pro střídavý souměrný cyklus, a tedy pro zkoušku vodorovnými silami platí za stejného předpokladu:

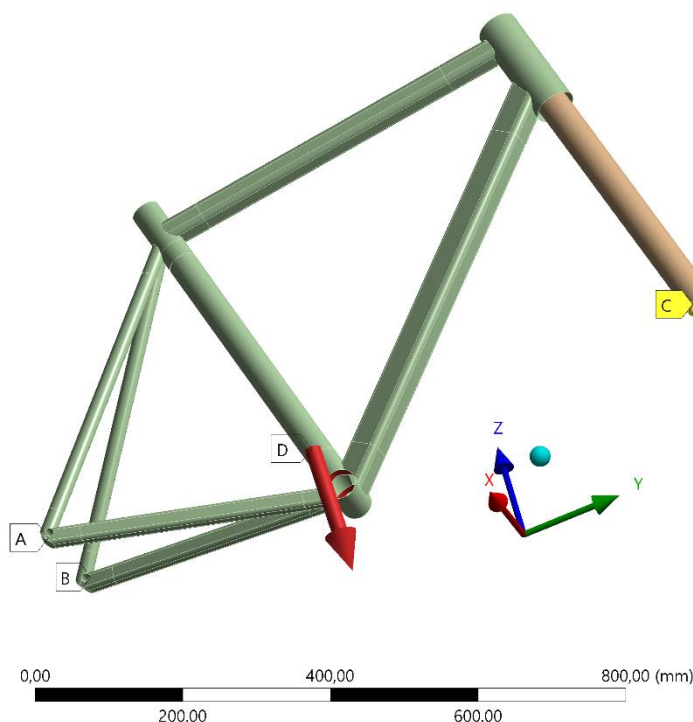
$$\sigma_a = \sigma_1$$

12 NUMERICKÉ SIMULACE ÚNAVOVÝCH ZKOUŠEK ZPEVNĚNÉHO RÁMU

Aby rám prošel zkouškou, je definováno, že na něm po ukončení zkoušky nesmí být žádné viditelné poškození. Viditelné poškození znamená, jak je uvedeno již v podkapitole 8.1, že nedošlo k poškození první vrstvy. Tedy je pro další postup nutné zjistit největší první hlavní napětí na rámu v první vrstvě a tím určit kritické místo. Dále je nutné zjistit, v jakém směru vzhledem ke směřům laminátu působí toto hlavní napětí. První hlavní napětí lze odečíst v programu ANSYS v modulu *Static Structural*, kde je značeno jako *Maximum Principal Stress*. Směr prvního hlavního napětí lze zjistit v tomtéž modulu při zobrazení *Vector Principal Stress*. Pro zjištění směru v první vrstvě laminátu je nutné přejít do ACP, kde k tomuto slouží funkce *Show Fiber Directions*. Následně je možné provést porovnání.

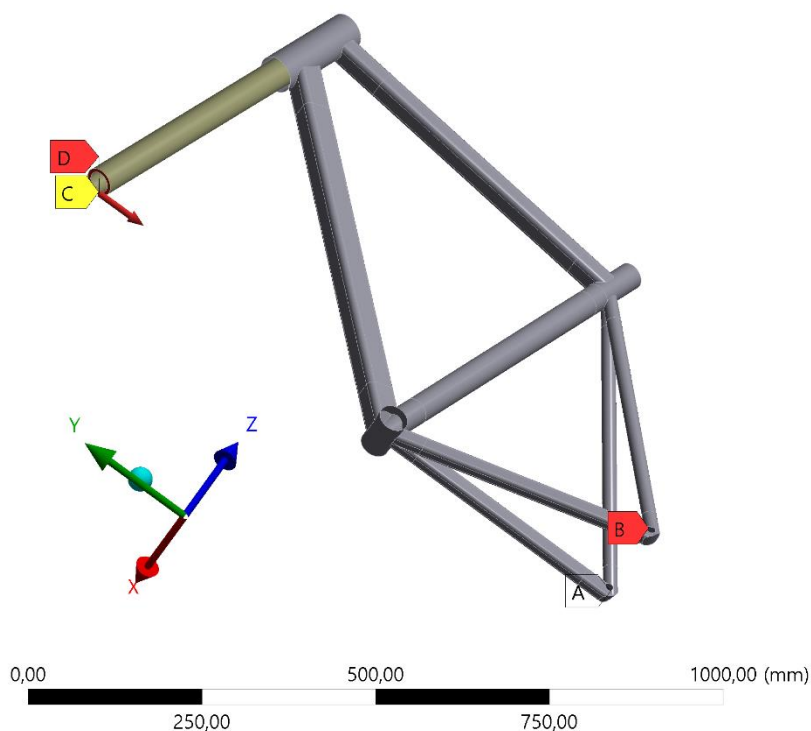
U všech tří únavových zkoušek bylo využito možnosti využít fiktivní vidlici. Co se týká sítě, byly použity prvky SHELL181 na rámu a SOLID186 na vidlici. Celkový počet prvků činil 23489 a počet uzlů 29603.

Pro simulaci zkoušky silami při šlapání byly zvoleny následující okrajové podmínky. Patkám vidlice bylo zamezeno posuvu ve všech směrech a rotaci kolem os y a z (viz okrajové podmínky A a B na obrázku 12.1). Patkám rámu byl zamezen posuv ve směru z (viz okrajová podmínka C na obrázku 12.1). Předepsaná síla (viz okrajová podmínka D na obrázku 12.1) má dle normy velikost 1100 N a působí pod úhlem $7,5^\circ$. Tato síla byla zadána jako *Remote Force* pomocí dvou složek – v ose x o velikosti ≈ 144 N a v ose z o velikosti ≈ 1091 N. Dle normy se síla aplikuje střídavě na obou stranách, vzhledem k symetrii rámu bychom ale při analýze obdrželi na obou stranách stejné výsledky, proto byla síla aplikována pouze na jednu stranu.



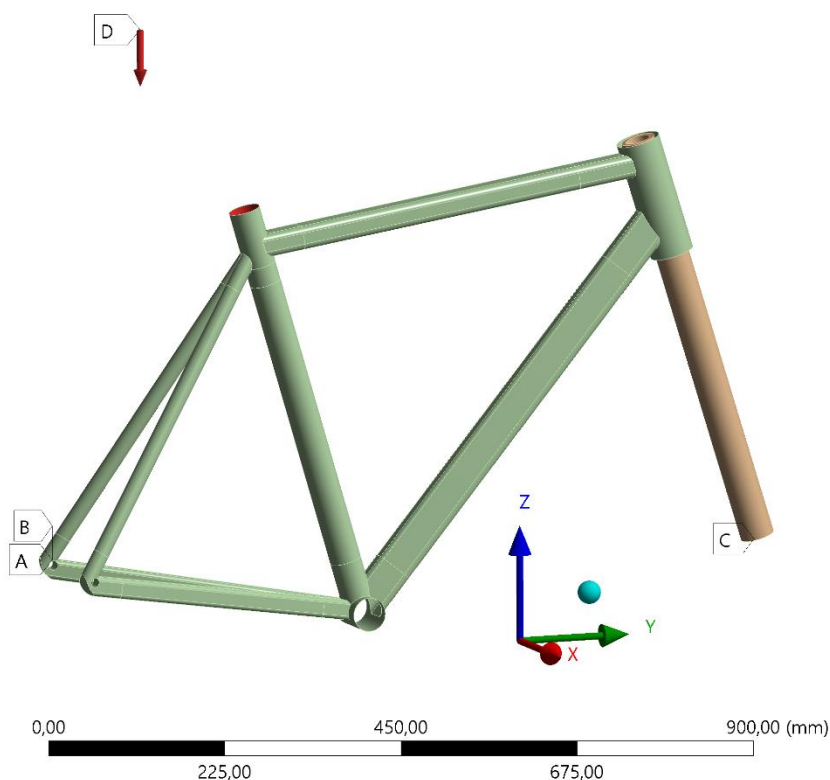
Obrázek 12.1: Okrajové podmínky – zkouška silami při šlapání

Pro simulaci zkoušky vodorovnými silami byly zvoleny následující okrajové podmínky. Patkám rámu bylo zamezeno posuvu ve všech směrech a rotaci kolem os y a z (viz okrajové podmínky A a B na obrázku 12.2). Patkám vidlice byl zamezen posuv ve směru z (viz okrajová podmínka C na obrázku 12.2). Předepsaná síla má dle normy velikost 600 N a působí střídavě ve směru $-y$ a y . V modelu je síla předepsána jako 300 N na levé patce vidlice a 300 N na pravé patce vidlice (viz okrajové podmínky D a E na obrázku 12.2), přičemž řešení se skládá ze dvou *Load Step* – v prvním je rám s vidlicí zatížen ve směru $-y$ a ve druhém ve směru y .



Obrázek 12.2: Okrajové podmínky – zkouška vodorovnými silami

Pro simulaci zkoušky svislou silou byly zvoleny následující okrajové podmínky. Patkám rámu bylo zamezeno posuvu ve všech směrech a rotaci kolem os y a z (viz okrajové podmínky A a B na obrázku 12.3). Patkám vidlice byl zamezen posuv ve směru z (viz okrajová podmínka C na obrázku 12.3). Zkušební síla o velikosti 1200 N byla aplikována jako *Remote Force* na plochy sedlové trubky v místech, kde se nachází sedlovka.

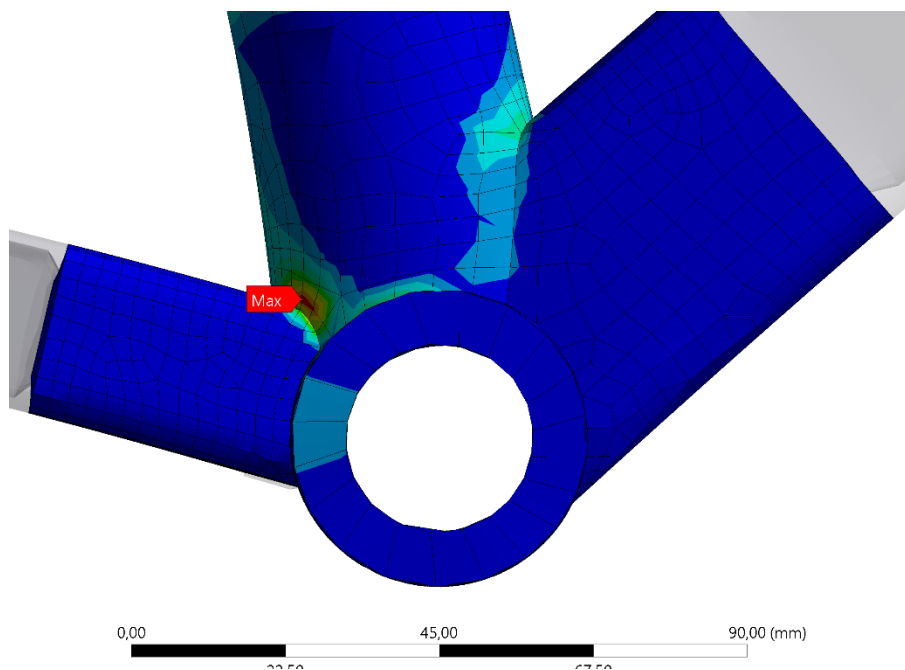


Obrázek 12.3: Okrajové podmínky – zkouška svislou silou

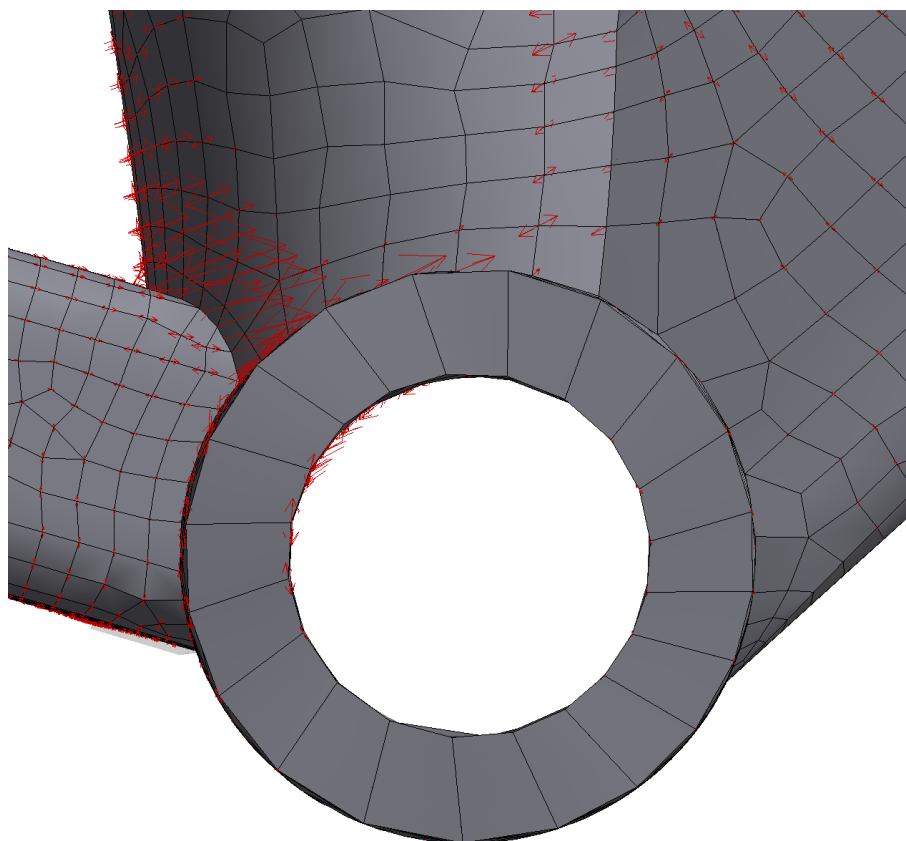
Kritická místa, hodnoty prvních hlavních napětí v kritických místech a orientace hlavních napětí v kritických místech v souřadnicovém systému laminátu jsou uvedeny v tabulce 12. Ukázka vyhodnocování je na obrázcích 12.4 – 12.6, je zde vyobrazena zkouška vodorovnými silami.

Tabulka 12: Hodnoty prvních hlavních napětí v kritických místech

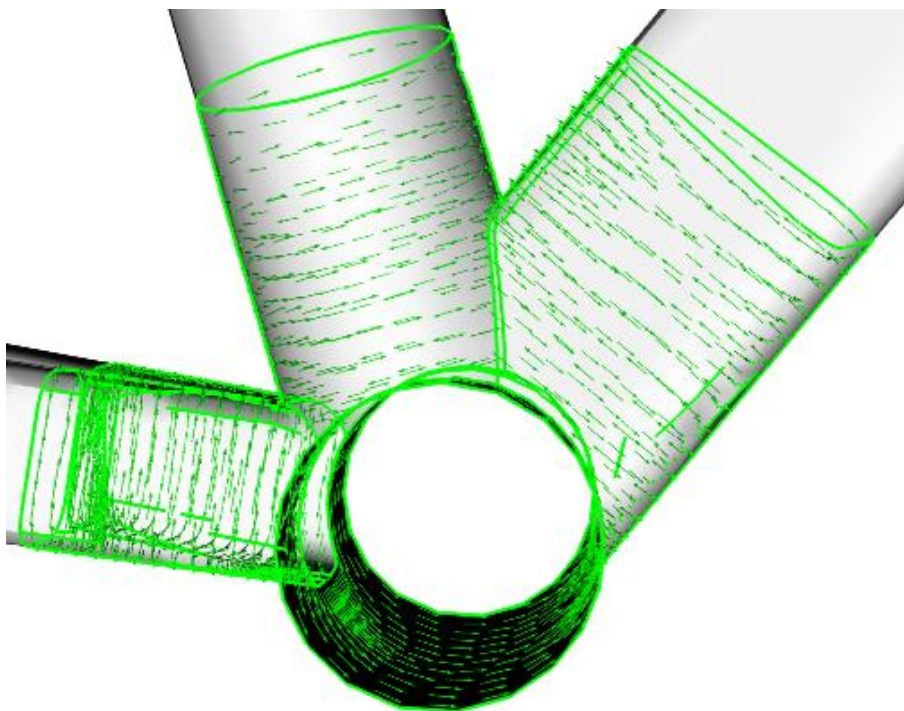
| zkouška | oblast výskytu kritického místa | σ_1 [MPa] | orientace σ_1 v souřadnicovém systému laminátu |
|--------------------|---------------------------------|---------------------|---|
| silami při šlapání | středové složení | 52 | longitudinální |
| vodorovnými silami | středové složení | 10 | longitudinální |
| svislou silou | horní rámová trubka | 58 | svírá úhel cca 45° mezi longitudinálním a transversálním směrem |



Obrázek 12.4: Místo s největším prvním hlavním napětím v první vrstvě – zkouška vodorovnými silami



Obrázek 12.5: Směr prvního hlavního napětí v kritickém místě v první vrstvě – zkouška vodorovnými silami



Obrázek 12.6: Longitudinální směr laminátu v první vrstvě – zkouška vodorovnými silami

V případě zkoušky silami při šlapání již bylo následujícím postupem možné určit součinitel bezpečnosti k_{sps} :

$$\sigma_{a;sps} = \frac{\sigma_{1;ANSYS;sps}}{2} \approx \frac{52}{2} = 26 \text{ MPa}$$

$$k_{sps} = \frac{\sigma_{a;max;l;sps}}{\sigma_{a;sps}} = \frac{1402}{26} \approx 54$$

kde:

$\sigma_{a;sps}$ [MPa] – amplituda napětí pro zkoušku silami při šlapání

$\sigma_{1;ANSYS;sps}$ [MPa] – první hlavní napětí v kritickém místě v první vrstvě při zkoušce silami při šlapání

$\sigma_{a;max;l;sps}$ [MPa] – maximální přípustná hodnota amplitudy napětí v longitudinálním směru při zkoušce silami při šlapání

Obdobným postupem bylo možné určit součinitel bezpečnosti při zkoušce vodorovnými silami k_{vs} :

$$\sigma_{a;vs} = \sigma_{1;ANSYS;vs} \approx 10 \text{ MPa}$$

$$k_{vs} = \frac{\sigma_{a;max;l;vs}}{\sigma_{a;vs}} \approx \frac{1642}{10} \approx 164$$

kde:

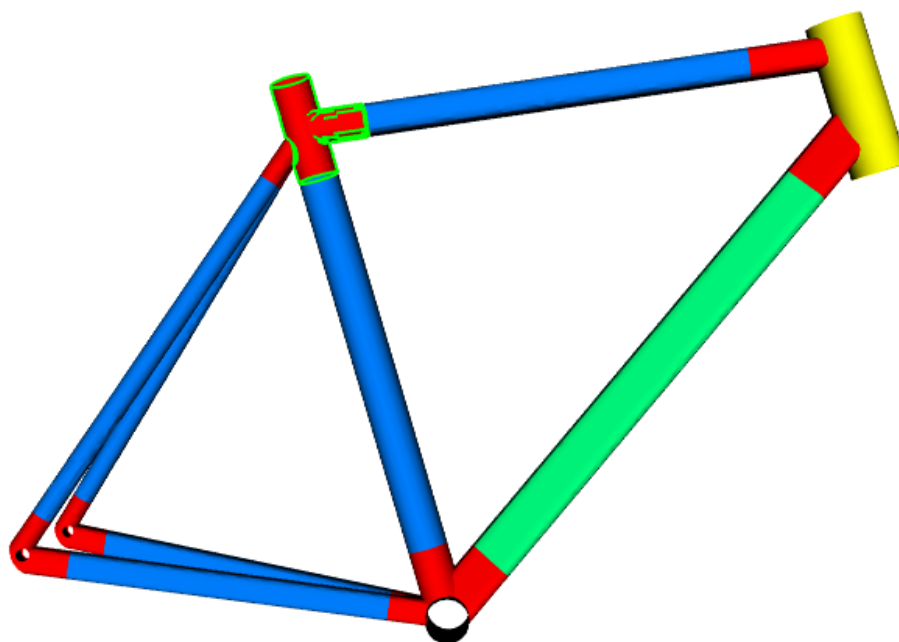
$\sigma_{a;vs}$ [MPa] – amplituda napětí při zkoušce vodorovnými silami

$\sigma_{1;ANSYS;vs}$ [MPa] – první hlavní napětí v kritickém místě v první vrstvě při zkoušce vodorovnými silami

$\sigma_{a;max;l;vs}$ [MPa] – maximální přípustná hodnota amplitudy napětí v longitudinálním směru při zkoušce vodorovnými silami

Dle výsledků tedy rám těmito dvěma zkouškami prošel. Co se týká zkoušky svislou silou, je vyhodnocení náročnější. První hlavní napětí se neztotožňuje s žádným směrem laminátu. Metodika v tomto případě není stanovena. Snahou je, pohybovat se vždy na „bezpečné straně“, proto byl výsledek této zkoušky považován za neuspokojivý a bylo přistoupeno k úpravě rámu. Do oblasti kritického místa byly přidány dvě vrstvy pod úhlem 30° – tloušťka kompozitu v tomto místě činila 8,4 mm. Konečná skladba v tomto místě (viz obrázek 12.7) vypadala následovně:

$$[30, 0, -45, 45, 90, 0, -45, 45, 90, 0, -45, 45, 90, 0, -45, 45, 90]_s$$



Obrázek 12.7: Zesílená oblast na základě výsledků z hlediska únavy (zeleně ohraničeno)

Po výše uvedeném zesílení rámu se kritické místo posunulo na sedlovou trubku. Směr prvního hlavního napětí v kritickém místě se shodoval s longitudinálním směrem laminátu. Součinitel bezpečnosti k_{ss} byl vyčíslen následovně:

$$\sigma_{a;ss} = \frac{\sigma_{1;ANSYS;ss}}{2} \approx \frac{56}{2} = 26 \text{ MPa}$$

$$k_{ss} = \frac{\sigma_{a;max;l;ss}}{\sigma_{a;ss}} \approx \frac{1402}{26} \approx 54$$

kde:

$\sigma_{a;ss}$ [MPa] – amplituda napětí při zkoušce svislou silou

$\sigma_{1;ANSYS;ss}$ [MPa] – první hlavní napětí v kritickém místě v první vrstvě při zkoušce svislou silou

$\sigma_{a;max;l;ss}$ [MPa] – maximální přípustná hodnota amplitudy napětí v longitudinálním směru při zkoušce svislou silou

Po provedeném zesílení rám tedy zkouškou prošel.

Byla provedena zpětná kontrola, zda rám s touto úpravou projde i ostatními zkouškami. Konečná skladba kompozitu je popsána v tabulce 13.

Tabulka 13: Konečná skladba kompozitu

| oblast použití | skladba | tloušťka [mm] | barevné značení na obrázku 10.9 |
|--|--|------------------|--|
| horní trubka, sedlová trubka, řetězové vzpěry, sedlové vzpěry | $[0, 90, -45, 45]_s$ | 1,6 | modrá |
| dolní trubka | $[0, 0, 90, 90, -45, 45, -45, 45]_s$ | 3,2 | zelená |
| vidlice | $[0, 0, 90, 90, 0, 0, -45, 45, -45, 45, -45, 45, -45, 45]_s$ | 5,6 | - |
| hlavová trubka | $[0, -45, 45, 90]_{4s}$ | 6,4 | oranžová |
| spoje trubek | $[0, -45, 45, 90]_{5s}$ | 8 | červená |
| oblast zesílení kvůli únavovým zkouškám | $[30, 0, -45, 45, 90, 0, -45, 45, 90, 0, -45, 45, 90, 0, -45, 45, 90, 0, -45, 45, 90]_s$ | 8,4 | zelené ohrazení |

13 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést rešeršní studii týkající se kompozitů ve vztahu k výrobě jízdních kol, zvolit materiál a navrhnout skladbu rámu silničního kola, analyzovat tento rám z pohledu tuhosti i pevnosti a závěrem vyhodnotit výsledky a formulovat doporučení pro další práci.

Rešeršní část se zabývá vláknovými kompozity, jejich výrobou a konkrétními technologiemi, které se používají při výrobě rámu. Hlavní poznatky z rešeršní části se dají shrnout následovně. Většina rámu jízdních kol je v současnosti vyrobena z vláknových kompozitů ve formě pre-pregu, které jsou nejčastěji složeny z uhlíkových vláken a polymerové matrice. Co se týká používaných technologií, je majoritně využívána technologie Monocoque. Na základě rešerše bylo rozhodnuto, že navrhovaný rám se tedy bude řídit přesně těmito trendy.

Další část práce tvoří přehled zkoušek, které rámy absolvují. Zkoušky jsou rozděleny do dvou skupin – tuhostní a pevnostní. Tuhostní zkoušky jsou prezentovány dvě, pevnostních pět, přičemž z toho dvě jsou rázem a tři jsou únavové. U pevnostních zkoušek, které jsou definovány normou, je popsáno jejich provedení a požadavky na úspěšné zvládnutí, přičemž vše je doplněno ilustracemi. U tuhostních zkoušek, které normou definované nejsou, je vždy zkouška popsána a ilustrována.

Po představení prováděných zkoušek následuje prvotní návrh rámu, který se odráží od prostudované literatury, ale také od dosavadních znalostí mechaniky kompozitů. Tento prvotní návrh má pouze dvě rozdílné skladby kompozitu, resp. dvě rozdílné tloušťky kompozitu – na hlavové a dolní rámové trubce je použit kompozit o tloušťce 3,2 mm, na všech ostatních trubkách je pak tloušťka 1,6 mm. Tento prvotní návrh rámu byl podroben numerické simulaci tuhostních zkoušek, kde obstál, nicméně již při provedení pevnostních zkoušek rázem se ukázalo, že není způsobilý a je třeba jej vyztužit.

Na základě obdržených výsledků je druhotní návrh rámu vyztužen v oblasti spojů trubek a na trubce hlavové. Na hlavové trubce činila tloušťka kompozitu 6,4 mm a v oblasti spojů 8 mm. Tloušťka ostatních trubek zůstala zachována. Takto vyztužený rám již pevnostními zkouškami rázem prošel.

Poslední zkoušky, kterými měl rám projít, byly zkoušky únavové. Nejprve bylo nutné najít způsob, jak únavu vyhodnotit, což velmi ztěžovala absence jakýchkoliv testů použitých skladeb kompozitu. Jakožto nejvhodnější způsob vyhodnocení byl vybrán diagram trvalé únavové pevnosti dle Harrise. U jednotlivých zkoušek byla zjištěna amplituda napětí, která byla následně porovnána s maximální přípustnou hodnotou. Z důvodu neuspokojivých výsledků bylo nutné opět rám vyztužit – v kritickém místě byly přidány dvě vrstvy navíc, se kterými již rám prošel.

Z práce vyplývají následující závěry. Numerická simulace zkoušek rámu jízdních kol možná jistě je, nicméně má své velké omezení týkající se únavových zkoušek. Při absenci dat ze zkoušek konkrétních použitých skladeb, lze použít jen velmi zjednodušená a tím pádem nepřiliš přesná kritéria pro vyhodnocení. Provádění únavových zkoušek materiálu je však velmi finančně a časově náročné, a proto je numerická simulace únavových zkoušek na zvážení.

Pro případné rozvinutí práce lze stanovit následující doporučení. Aby bylo možné přesněji vyhodnocovat únavové zkoušky rámu, je nevyhnutelné provést únavové zkoušky materiálu a získat tak materiálové charakteristiky sloužící jako vstup do komplikovanějších kritérií. Protože se potenciální kritická místa často nacházejí v oblasti spojů, bylo by vhodné použít submodeling těchto oblastí. Při vyhodnocování zkoušek s padajícím rámem, resp. padajícím závažím, by bylo vhodné porovnat výsledky získané na základě kritéria Tsai-Wu s výsledky jiných kritérií. Dále by bylo žádoucí zaměřit se na přechod mezi jednotlivými tloušťkami kompozitu, aby v těchto místech nevznikaly skokové změny, které zbytečně oslabují rám.

14 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JURAČKA, Jaroslav. *Kompozitní konstrukce v letectví*. Brno: 2007, 113 s.
- [2] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. Brno: Technický dozorčí spolek Brno - Sekce materiálů a svařování, 2003
- [3] COLAN Australia Composite Reinforcement: Fibre Comparrison Tables [online]. [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: <http://www.colan.com.au/compositereinforcement/resources/fibre-information/fibre-comparison-charts>
- [4] AzO Materials: E-Glass Fibre [online]. [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=764>
- [5] AzO Materials: S-Glass Fibre [online]. [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=764>
- [6] WEISS, Zdeněk, Grażyna SIMHA-MARTYNKOVÁ a Ondřej ŠUSTAI. *Nanostruktura uhlíkatých materiálů*. Ostrava: Repronis, 2005. Nanotechnologie a nanomateriály. ISBN 8073290839.
- [7] The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association: What is carbon fiber? [online]. [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: <https://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/what.html>
- [8] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno: 2008, 94 s.
- [9] BARBERO, Ever J. *Introduction to composite materials design*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, [2018]. ISBN 978-1138196803
- [10] Premix: Performance composites [online]. [cit. 2019-09-22]. Dostupné z: <https://www.premix.com/materials/>
- [11] Cyclingtips: How Carbon fiber bicycle frame are made [online]. [cit. 2019-09-22]. Dostupné z: <https://cyclingtips.com/2018/01/how-carbon-fibre-bicycle-frames-are-made/>
- [12] Cyclingtips: Carbon fiber: Peeling back the layers [online]. [cit. 2019-09-22]. Dostupné z: <https://www.bicycling.com/bikes-gear/a20022549/carbon-fiber-bike-construction/>
- [13] Allied Cycleworks: Stories [online]. [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: <https://alliedcycleworks.com/blogs/stories?page=1>
- [14] UCI: World Tour: regulations [online]. [cit. 2019-09-22]. Dostupné z: <https://www.uci.org/inside-uci/constitutions-regulations/regulations>
- [15] UAE: Team Emirates [online]. [cit. 2019-09-22]. Dostupné z:

<http://www.uaeteamemirates.com/>

[16] *EFBE Prüftechnik: Test Service* [online]. [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: <https://www.efbe.de/#vier>

[17] ČSN EN ISO 4210-2 (309000). *Jízdní kola: Bezpečnostní požadavky na jízdní kola*. 2018.

[18] *Kross: Rowery Szosowe – Vento TE* [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://kross.eu/pl/rowery/szosowe/road/vento-te-czerwony-bialy-czerwony-polysk>

[19] JAN, Čapek. *Návrh a analýza horského kola z uhlíkového kompozitu*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ctirad Novotný.

[20] LIU, Thomas Jin-Chee a Huang-Chieh WU. Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon/epoxy composite laminate. *Materials & Design*. Nizozemsko: Elsevier, 2010, **31**(4), 10. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.10.036. ISSN 0264-1275.

[21] FUERLE, Fabian a Johann SIENZ. Decomposed surrogate based optimization of carbon-fiber bicycle frames using Optimum Latin Hypercubes for constrained design spaces. *Computers & Structures*. Elsevier, 2013, **49**(119), 12. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.11.014. ISSN 0045-7949.

[22] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku - chemické složení a druhy tvářených výrobků: Část 3: Chemické složení*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 2004.

[23] ČSN EN 754-2. *Hliník a slitiny hliníku - tyče a trubky tažené za studena: Část 2: Mechanické vlastnosti*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1999.

[24] *ANSYS Help: Element Reference – SHELL181* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html

[25] *ANSYS Help: Element Reference – SOLID186* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html

[26] *ANSYS Help: Element Reference – SOLID187* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/ans_elem/Hlp_E_SOLID187.html

[27] *Fatigue in Composites: Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2003. ISBN 978-1-85573-608-5.

[28] VASSILOPOULOS, Anastasios a Thomas KELLER. *Fatigue of Fiber-reinforced Composites*. 1. Londýn: Springer, 2011. ISBN 978-1-84996-181-3.

15 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PAN – polyakrylonitril

JCFA – The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association (Japonské asociace výrobců uhlíkových vláken)

UHM – Ultra high elastic modulus uhlíková vlákna

HM – High Elastic Modulus uhlíková vlákna

IM – Intermediate elastic modulus uhlíková vlákna

HT – Standard elastic modulus uhlíková vlákna

LM – Low elastic modulus uhlíková vlákna

CM – Compression Molding (metoda lisování)

SMC – Sheet Molding Compound (typ směsi při metodě lisování)

BMC – Bulk Molding Compound (typ směsi při metodě lisování)

RTM – Resin Transfer Molding (metoda lisování se vstřikem matrice)

VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

UAE – United Arab Emirates (Spojené arabské emiráty)

UCI – Union Cycliste Internationale (Mezinárodní cyklistická unie)

$K_1[-]$ – konstanta ve vzorci pro náhradu vidlice, $K_1 = 1417$

δ [mm] – průhyb náhrady vidlice

L [mm] – délka náhrady vidlice

$K_2[-]$ – konstanta ve vzorci pro náhradu vidlice, $K_2 = 709$

h_1 [mm] – výška, do které se zvedne závaží při zkoušce rázem s padajícím závažím

j_1 [mm] – maximální přípustná hodnota trvalé deformace vidlice při zkoušce rázem s padajícím závažím

$v_{vp} \left[\frac{m}{s} \right]$ – rychlost volného pádu

E [mm] – vysunutí sedlovky při zkoušce rázem s padajícím rámem

M_1 [kg] – hmotnost závaží na sedlovce při zkoušce rázem s padajícím rámem

M_2 [kg] – hmotnost závaží na hlavové trubce při zkoušce rázem s padajícím rámem

M_3 [kg] – hmotnost závaží v oblasti středového složení při zkoušce rázem s padajícím rámem

h_2 [mm] – výška, do které se zvedne rám před upuštěním při zkoušce rázem s padajícím rámem

j_2 [mm] – maximální přípustná hodnota trvalé deformace rozvoru při zkoušce rázem s padajícím rámem

R_w [mm] – výška, ve které je uchycen rám při zkoušce silami při šlapání

K [mm] – délka klik při zkoušce silami při šlapání

R_c [mm] – délka náhrady převodníku při zkoušce silami při šlapání

F_1 [N] – zatěžující síla při zkoušce silami při šlapání

F_2 [N] – zatěžující síla při zkoušce vodorovnými silami

F_3 [N] – zatěžující síla při zkoušce vodorovnými silami

h_3 [mm] – vysunutí sedlovky při zkoušce svislou silou

F_4 [N] – zatěžující síla při zkoušce svislou silou

F_{OSR} [N] – zatěžující síla při zkoušce Out of Saddle Rigidity

$F_{OSR;x}$ [N] – složka síly F_{OSR} ve směru osy x

$F_{OSR;z}$ [N] – složka síly F_{OSR} ve směru osy z

$u_{OSR;Al}$ [mm] – průhyb rámu ze slitiny hliníku při zkoušce Out of Saddle Rigidity

$k_{OSR;Al} \left[\frac{N}{mm} \right]$ – tuhost rámu ze slitiny hliníku při zkoušce Out of Saddle Rigidity

- $k_{OSR;k} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$ – tuhost rámu z kompozitu při zkoušce Out of Saddle Rigidity
 F_{THR} [N] – zatěžující síla při zkoušce Track Holding Rigidity
 $k_{THR;Al} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$ – tuhost rámu ze slitiny hliníku při zkoušce Track Holding Rigidity
 $k_{THR;k} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$ – tuhost rámu z kompozitu při zkoušce Track Holding Rigidity
 $E_{p;zavazi}$ [J] – potenciální energie závaží v poloze před uvolněním při zkoušce rázem s padajícím závažím
 A_{pz} [J] – práce vykonaná vnější silou při zkoušce rázem s padajícím závažím
 m_{zavazi} [kg] – hmotnost závaží při zkoušce rázem s padajícím závažím
 $g \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$ – tíhové zrychlení
 $k_y \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$ – tuhost (vidlice) v místě působení síly při zkoušce rázem s padajícím závažím
 u_y [m] – posuv vyvolaný působící silou při zkoušce rázem s padajícím závažím
 $F_{test;1}$ [N] – testovací síla při zkoušce rázem s padajícím závažím
 F_{pz} [N] – zatěžující síla při zkoušce rázem s padajícím závažím
 UCS [MPa] – mez pevnosti v tlaku
 UTS [MPa] – mez pevnosti v tahu
 σ_l [MPa] – napětí v longitudinálním směru
 σ_t [MPa] – napětí v transversálním směru
 σ_o [MPa] – napětí v ortogonálním směru
 τ_{lt} [MPa] – smykové napětí v rovině $l - t$
 τ_{lo} [MPa] – smykové napětí v rovině $l - o$
 τ_{to} [MPa] – smykové napětí v rovině $t - o$
 UTS_l [MPa] – mez pevnosti v tahu v longitudinálním směru
 UTS_t [MPa] – mez pevnosti v tahu v transversálním směru
 UTS_o [MPa] – mez pevnosti v tahu v ortogonálním směru
 UCS_l [MPa] – mez pevnosti v tlaku v transversálním směru
 UCS_t [MPa] – mez pevnosti v tlaku v transversálním směru
 UCS_o [MPa] – mez pevnosti v tlaku v ortogonálním směru
 USS_{lt} [MPa] – mez pevnosti ve smyku v rovině $l - t$
 USS_{lo} [MPa] – mez pevnosti ve smyku v rovině $l - o$
 USS_{to} [MPa] – mez pevnosti ve smyku v rovině $t - o$
 $E_{k;1}$ [J] – kinetická energie rámu se závažími ve výchozím stavu (před upuštěním) při zkoušce rázem s padajícím rámem
 $E_{p;1}$ [J] – potenciální energie rámu se závažími ve výchozím stavu (před upuštěním) při zkoušce rázem s padajícím rámem
 $E_{k;2}$ [J] – kinetická energie rámu se závažími v konečném stavu (po upuštění) při zkoušce rázem s padajícím rámem
 $E_{p;2}$ [J] – potenciální energie rámu se závažími v konečném stavu (po upuštění) při zkoušce rázem s padajícím rámem
 A_{pr} [J] – práce vnějších sil při zkoušce rázem s padajícím rámem
 m_{celek} [kg] – hmotnost rámu s vidlicí a se závažími
 I_o [kg · m²] – moment setrvačnosti rámu se závažími vzhledem k ose otáčení (osa prochází patkami rámu) při zkoušce rázem s padajícím rámem
 ω [rad · s⁻¹] – úhlová rychlost rámu se závažími při zkoušce rázem s padajícím rámem
 $k_z \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$ – tuhost na konci sedlové trubky při zkoušce rázem s padajícím rámem

$F_{test;2}$ [N] – libovolně volená síla pro určení tuhosti při zkoušce rázem s padajícím rámem
 u_z [m] – posuv v místě působení zvolené síly při zkoušce rázem s padajícím rámem
 F_{pr} [N] – zatěžující síla při zkoušce rázem s padajícím rámem
 a [–] – normovaná amplituda napětí
 f [–] – parametr únavového života
 u [–] – exponent únavového života
 v [–] – exponent únavového života
 m [–] – normované střední napětí
 c [–] – normovaná mez pevnosti v tlaku
 σ_a [MPa] – amplituda napětí
 σ_m [MPa] – střední napětí
 UTS [MPa] – mez pevnosti v tahu
 UCS [MPa] – mez pevnosti v tlaku
 A [–] – parametr únavového života
 p [–] – exponent únavového života
 $\sigma_{a;max}$ [MPa] – maximální amplituda napětí pro zkoušky silami při šlapání a svislou silou
 $\sigma_{a;max;2}$ [MPa] – maximální amplituda napětí pro zkoušku vodorovnými silami
 $\sigma_{a;max;l}$ [MPa] – maximální amplituda napětí pro longitudinální směr
 $\sigma_{a;max;t}$ [MPa] – maximální amplituda napětí pro transversální směr
 $\sigma_{a;max;o}$ [MPa] – maximální amplituda napětí pro ortogonální směr
 σ_1 [MPa] – první hlavní napětí
 $\sigma_{a;sps}$ [MPa] – amplituda napětí pro zkoušku silami při šlapání
 $\sigma_{1;ANSYS;sps}$ [MPa] – první hlavní napětí v kritickém místě v první vrstvě při zkoušce silami při šlapání
 $\sigma_{a;max;l;sps}$ [MPa] – maximální přípustná hodnota amplitudy napětí v longitudinálním směru při zkoušce silami při šlapání
 k_{sps} [–] – součinitel bezpečnosti při zkoušce silami při šlapání
 $\sigma_{a;vs}$ [MPa] – amplituda napětí při zkoušce vodorovnými silami
 $\sigma_{1;ANSYS;vs}$ [MPa] – první hlavní napětí v kritickém místě v první vrstvě při zkoušce vodorovnými silami
 $\sigma_{a;max;l;vs}$ [MPa] – maximální přípustná hodnota amplitudy napětí v longitudinálním směru při zkoušce vodorovnými silami
 k_{vs} [–] – součinitel bezpečnosti při zkoušce vodorovnými silami
 $\sigma_{a;ss}$ [MPa] – amplituda napětí při zkoušce svislou silou
 $\sigma_{1;ANSYS;ss}$ [MPa] – první hlavní napětí v kritickém místě v první vrstvě při zkoušce svislou silou
 $\sigma_{a;max;l;ss}$ [MPa] – maximální přípustná hodnota amplitudy napětí v longitudinálním směru při zkoušce svislou silou
 k_{ss} [–] – součinitel bezpečnosti při zkoušce svislou silou